

ANNEXES TECHNIQUES

A12 - SÉDIMENTS LIBRES/IMMOBILISÉS – OCCURRENCES PROBABLES

Cette typologie permet de pré-qualifier le ou les types de sédiments qui seront potentiellement rencontrés : sédiments libres et/ou sédiments immobilisés. Cela conduit à évaluer le risque de rencontrer des sédiments anciens qui peuvent être plus contaminés.

Type d'intervention		Sédiments libres	Sédiment immobilisés
Entretien chenal de navigation	Chenal dans le lit du cours d'eau	X	Seulement si surcreusement
	Désenvasement ouvrages	X	Seulement si surcreusement
	Garages d'écluse	X	non
	Darses	X	X
Création d'ouvrage (nouvel ouvrage ou redimensionnement d'ouvrage existant)	Creuser un chenal dans un cours d'eau ou un canal	X X - Si creusement dans un cours d'eau existant	X
	Nouvelle darse, plan d'eau, port,	X - Seulement si creusement dans un cours d'eau ancien ou existant	X
	Autres interventions : pile pont, remblai routier, passe à poisson, usine hydroélectrique, barrage, ...	X - Seulement si creusement dans un cours d'eau ancien ou existant	X
Entretien du cours ou plan d'eau	Renforcement et réhabilitation de berges	x	X
	Curage du cours d'eau	x	X
	Décolmatage des berges et du fond Entretien des ouvrages d'art	X	x
Action morphologiques	Dépôt de type casier Girardon	non	X
	Réactivation de lônes et bras morts	X - Si lône et bras-mort encore actifs, notamment lors des crues	X
	Faciliter le transport sédimentaire	X	x
Remobilisation d'accumulations de sédiments dans les cours d'eau	Atterrissements	X - A la marge	X
	Confluences	X - A la marge	X
	Ralentir le transport sédimentaire	X	non
Piège à sédiments		X	non
Extraction de sédiments contaminés		X	X
Chasses de sédiments accumulés dans les ouvrages de retenue		x	X
Entretien d'une retenue hydro-électrique	Dragage d'une retenue endiguée	X	x
	Dragage d'une confluence	X	x
	Dragage des ouvrages (sondes ...)	X	x

Tableau 14 - Dragage d'entretien CNR 2008-2012-concentration en PCB_i sur les échantillons réalisés avant travaux

A13 - ELÉMENTS POUR LA DÉCISION D'ENTREPRENDRE LES TRAVAUX

Dans le cas de processus dérogatoire aux principes généraux des recommandations, il convient de s'appuyer sur l'examen :

- d'une **liste d'avantages et désavantages**, qualifiés selon leur intérêt ou leur gravité ;
- dont un des termes majeur consiste en une **relativisation des impacts** sur le milieu aquatique, en proposant de **raisonner en flux de contaminants** remis en circulation plutôt qu'en seuils de concentration.

A13.1 - LISTES DES AVANTAGES ET DÉSAVANTAGES

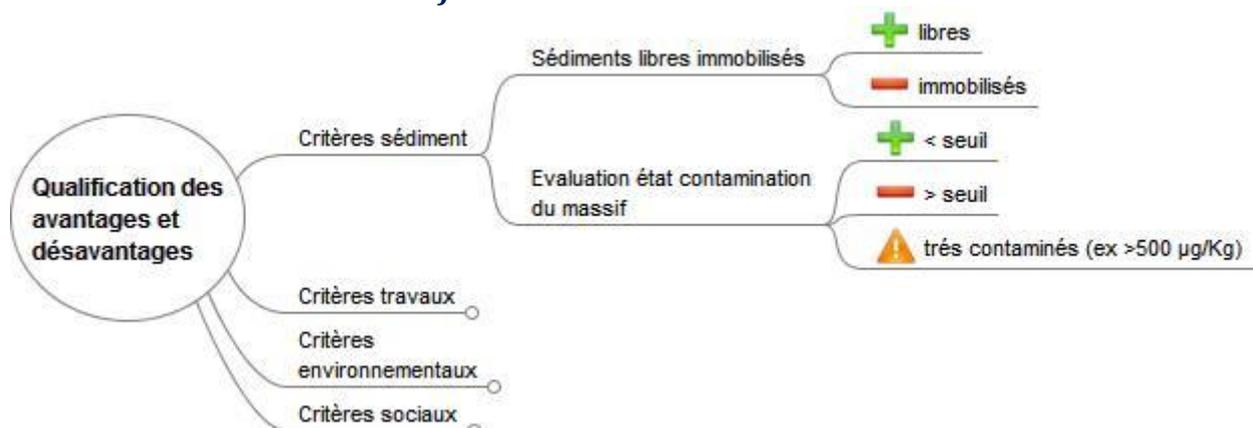
La décision d'entreprendre des travaux mettant en œuvre des sédiments aquatiques contaminés doit s'appuyer sur une analyse des avantages/inconvénients à réaliser ces travaux selon des critères qu'il convient de qualifier et de classer afin de les rendre les plus objectifs possibles.

Avertissements : Les critères qui sont listés ci-dessous sont spécifiques et réduits à la problématique sédiments aquatiques contaminés. Ils viennent en complément des critères classiques d'évaluation de l'impact.

Les critères sont répartis en 4 familles :

- Sédiments
- Travaux
- Environnementaux
- Sociaux.

A13.1.1 - Critères relatifs aux Sédiments



Sédiments libres-immobilisés

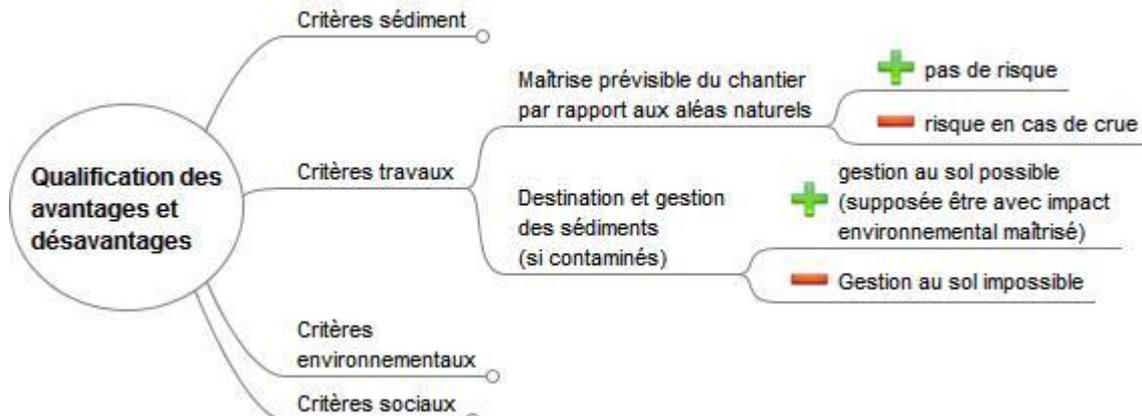
- Les sédiments libres sont susceptibles d'être dispersés par le courant ou les crues : leur remise en eaux peut être considérée comme une possible anticipation d'un événement qui risque de se produire.
Critère neutre ou positif (à décider)
- Les sédiments immobilisés, ne posent pas de problèmes tant qu'on n'y touche pas. La décision de les remettre à l'eau est lourde de conséquence.
Critère négatif.

Niveau de contamination des sédiments

En réalité, la qualification est plus complexe car on a généralement une multi-contamination (cf méthode écotox de type VNF, H14). Sur le seul critère PCB :

- Inférieurs au seuil : la dégradation aval ou périphérique est réelle mais mesurée dans son impact environnemental.
Positif
- Supérieur au seuil : il y a dégradation environnementale certaine.
Négatif
- Très sup. au seuil (ex : > 500 ??? µg/Kg) : on est à des niveaux prohibitifs qui devraient remettre en cause l'opération.
Opération impossible.

A13.1.2 - Critères relatifs aux travaux



Maîtrise prévisible du chantier par rapport aux aléas naturels

Renseigne sur le niveau d'aléa du chantier en lien avec les conditions naturelles et techniques pouvant être rencontrées pendant la réalisation (maîtrise des sédiments manipulés, impacts d'une crue survenant durant les opérations – lien avec la durée prévisible, ...)

Aléas chantiers :

- faibles : positif
- moyen : négatif
- forts (dont risque en cas de crue) : opération impossible si contamination supérieure à 100-200 ??

Destination et gestion des sédiments (si contaminés)

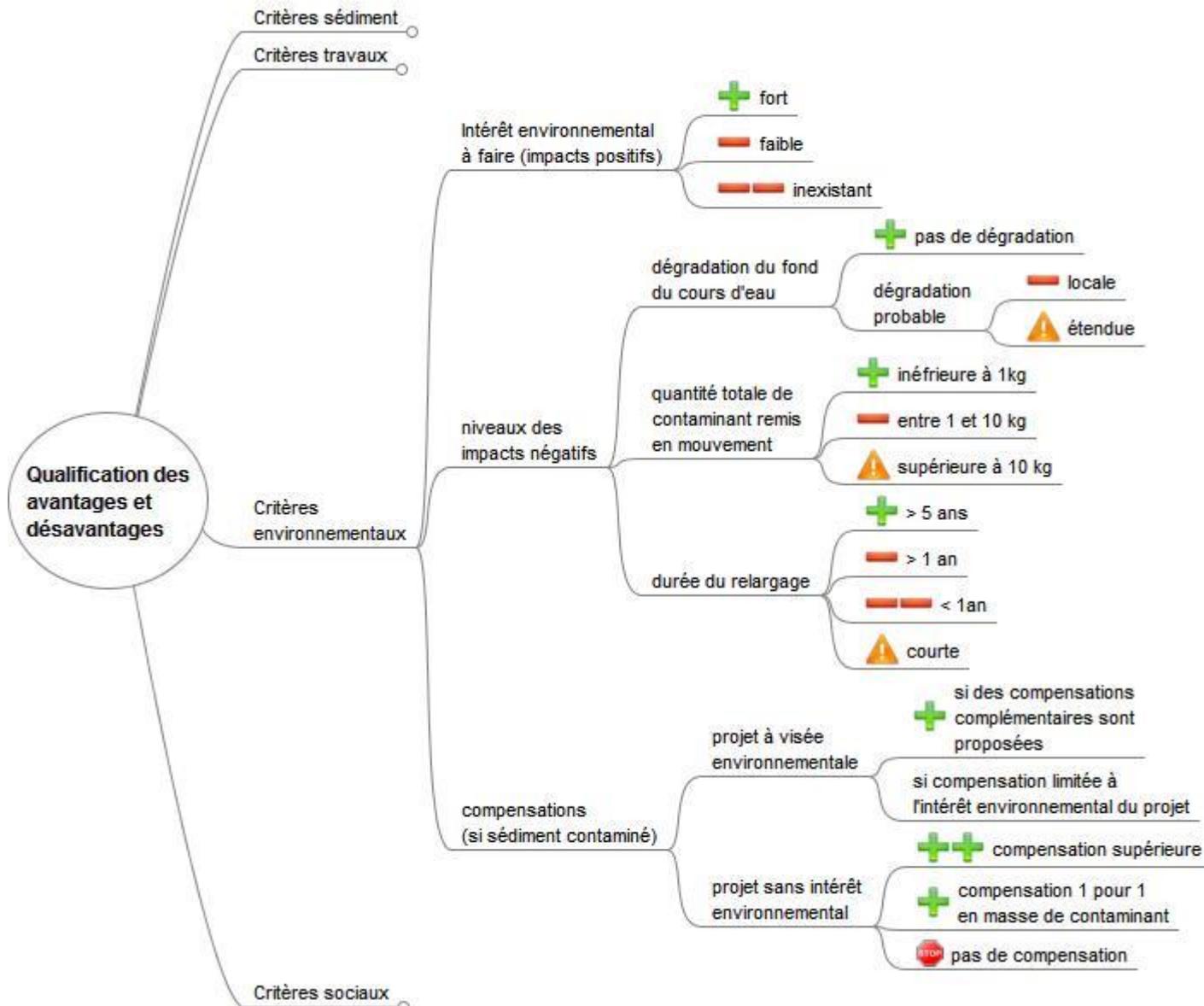
Gestion au sol possible (supposée être avec impact environnemental maîtrisé)

Dans le cas de sédiments faiblement contaminés caractérisés comme non dangereux, l'existence d'une possibilité de valorisation simplifie le problème en cas de nécessité d'extraction. A contrario, la difficulté à envisager une valorisation au sol (difficulté technique à charger sur barges ou camions, transport en camion très impactant, coûts induits justifiés comme exagérés, ...) force, si la décision de faire les travaux doit être prise, à une remise à l'eau des sédiments.

Gestion au sol :

- aisée : très positif
- possible : positif
- impossible : négatif

A13.1.3 - Critères environnementaux



Intérêt environnemental à faire

Opération motivée par un intérêt environnemental :

- Opération uniquement à visée environnementale : très positif
- Faible : négatif
- Inexistants : très négatif à « opération impossible » si impacts.

Impacts

Dégradation du fond du cours d'eau à l'aval ou en périphérie :

- Pas de dégradation : positif
- Dégradation probable locale : négatif
- Dégradation probable étendue : opération impossible

Quantité totale de contaminants remis en circulation :

- Inférieur à 1 Kg de PCB_i : positive ou neutre
- Entre 1 et 3 Kg : négative (modifier chiffre dans schéma)
- Sup à 3 Kg : opération impossible ? Quota annuel dépassé.

Durée du relargage (ne change pas la quantité de contaminants remis en circulation ni la quantité qui arrivera en mer, mais diminue la biodisponibilité par réduction des concentrations des sédiments déposés) :

- Sup. 5 ans : positif
- Inf. 1 an : négatif
- Inf. 1 an : très négatif
- Courte : opération impossible si sédiments contaminés et vol. important (devrait être réglé par calcul)

Compensations

La compensation doit être évoquée lorsque les travaux ont un impact négatif sur l'environnement.

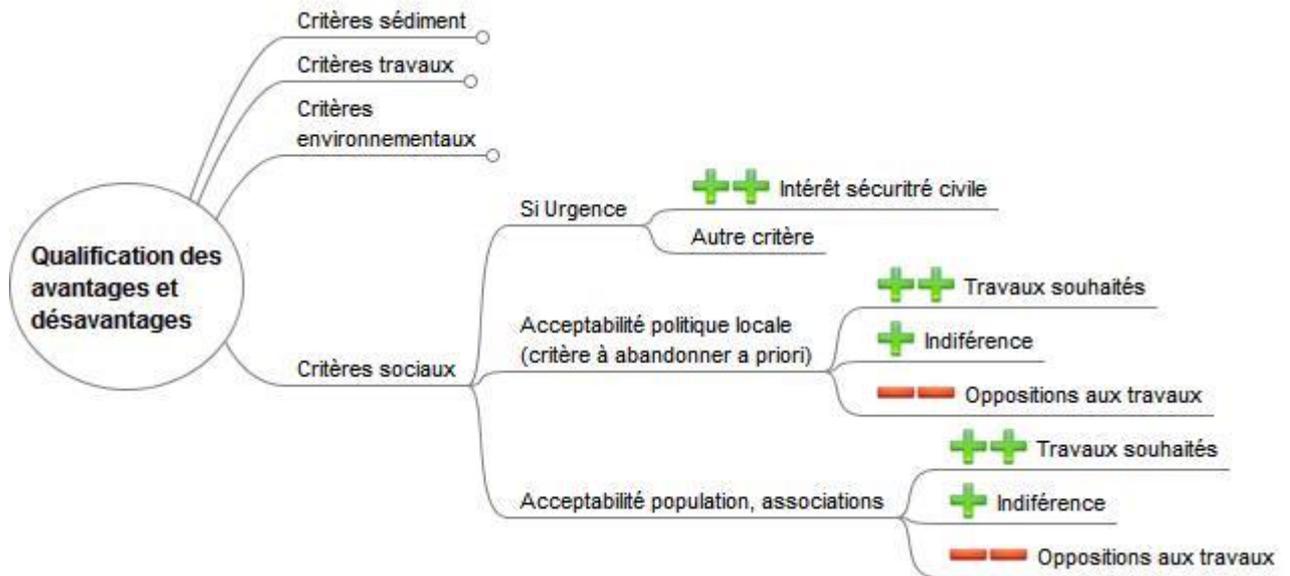
Si l'opération a un intérêt environnemental, on peut considérer que la compensation est la motivation de l'opération, à condition de donner les éléments d'équilibre entre avantages/désavantages pour vérifier qu'on n'a pas un déséquilibre : intérêt environnemental moyen et impact fort :

- Compensations complémentaires : positif
- Pas de compensations complémentaires : neutre.

Si l'opération n'a pas d'intérêt environnemental, la compensation ne peut être recherchée que dans une contre-mesure visant à diminuer une source de contaminant dans les mêmes proportions que les contaminants remis dans le milieu : recherche et traitement de décharge sauvages, traitement d'un point chaud, ... :

- Compensation supérieure à impacts (plus de contaminants éliminés sur un site contaminé (le même ou un autre site) que de contaminants remis en circulation dans le milieu aquatique par l'opération) : très positif
- Compensation à 1 pour 1 : positif
- Pas de compensation : opération impossible

A13.1.4 - Critères sociaux



Urgence

Ce critère est difficile à manipuler. On suppose que le critère d'urgence est attribué par l'autorité administrative avec discernement. Vérifier toutefois que l'urgence n'exclue pas des mesures de réduction des impacts comme une remise à terre provisoire, une limitation de l'intervention au strict nécessaire, ...

Acceptabilité : politique locale

Renseigne sur le contexte politique local. Décrit l'importance relative de l'aspect politique de la décision à faire ou ne pas faire.

Maintien à discuter avec le groupe.

Situation du projet en regard du droit

A rajouter au schéma ???

Renseigne sur les possibles difficultés d'ordre juridique, voire les conflits de droit que le projet soulève, tant par une décision de le faire que de ne pas le réaliser. Décrit l'importance relative de l'aspect politique de la décision à faire ou ne pas faire.

Paramètre : aucun obstacle réglementaire, difficulté réglementaire/juridique prévisible.

Acceptabilité : populations, Associations

Renseigne sur le contexte d'acceptation/opposition des populations locales et associations. Décrit l'importance relative de l'aspect politique de la décision à faire ou ne pas faire.

- Travaux souhaités : très positif
- Indifférence : positif
- Opposition : très négatif ? ou négatif ?

A14 - ECHANTILLONNAGE DES SÉDIMENTS

A14.1 - PREAMBULE

Rappel sur les étapes de chaîne complète du diagnostic sédimentaire :

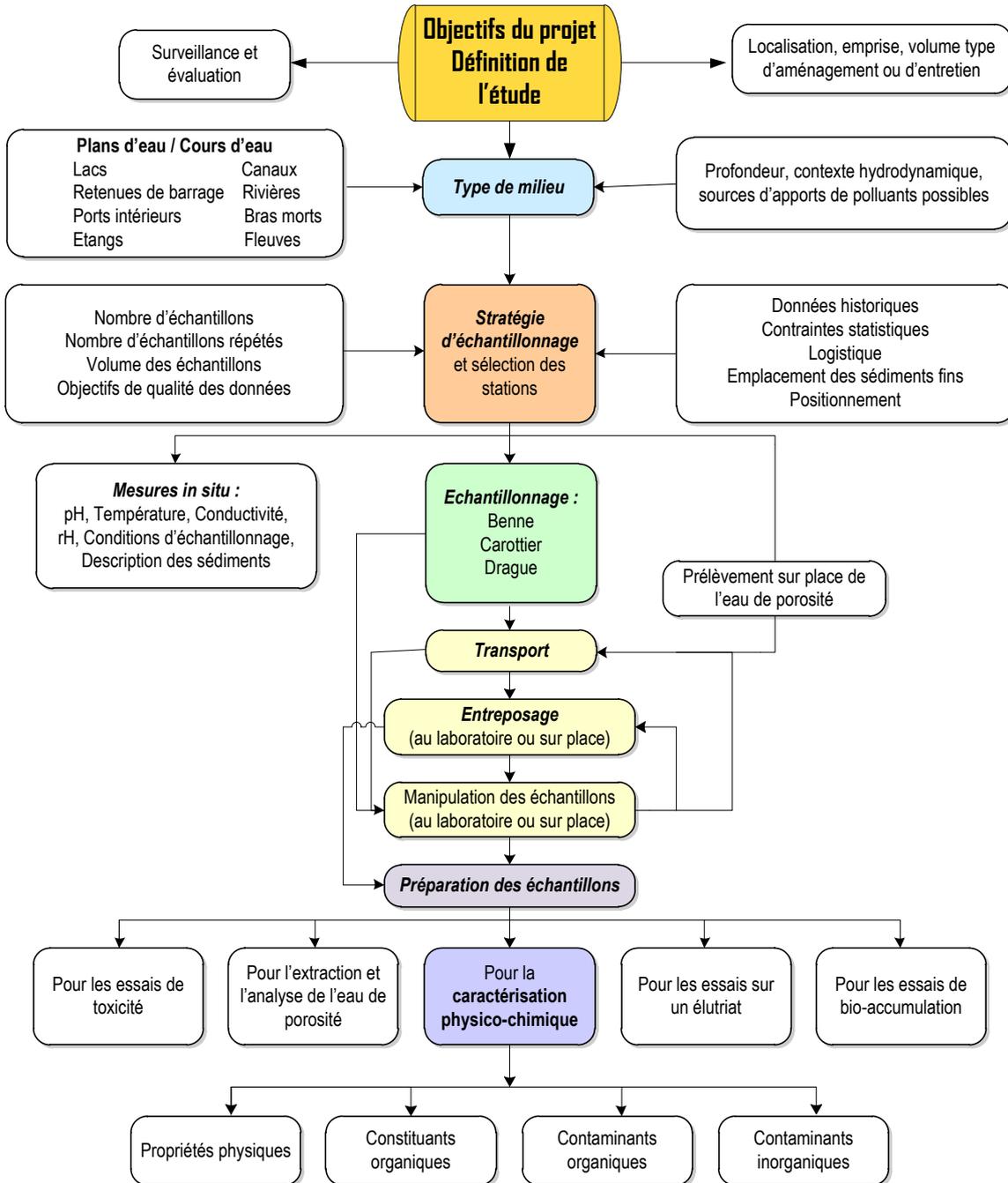


Figure 82 : Organigramme de la chaîne complète d'un diagnostic sédimentaire [d'après Env. Canada, 1994]

A14.2 - STRATÉGIES D'ÉCHANTILLONNAGE

La définition du plan d'échantillonnage est la première étape de la campagne diagnostic du massif sédimentaire. De sa pertinence dépendent largement les interprétations qui seront posées à l'issue de la phase d'analyses physico-chimiques. L'objectif du plan d'échantillonnage est donc de garantir la représentativité horizontale et verticale du degré de contamination du gisement de sédiment.

Actuellement, il n'existe pas de prescriptions réglementaires définissant les modalités d'échantillonnage des sédiments en cours d'eau ou plan d'eau, à l'image de ce qui existe dans le cadre des opérations de dragage en milieu maritime [METL, 2000 : Circulaire n°2000-62 du 14 juin].

Pour rappel, la réglementation nationale [JORF n°147 - Arrêté du 30 mai 2008 – Article 5] indique qu'en cas d'opération de curage « les échantillons de sédiment doivent être représentatifs du contexte local au moment des travaux. En particulier, leur nombre et les modalités d'obtention doivent être cohérents avec la surface concernée, la nature granulométrique et physico-chimique du sédiment ».

A14.2.1 - Définition d'un plan d'échantillonnage

a) Représentativité horizontale ou maillage

Le nombre des stations de prélèvement est une question d'échelle de projet et d'objectif de représentation. L'effort d'échantillonnage à prévoir peut s'apprécier selon la portée même du projet ou de l'étude (depuis un diagnostic ponctuel, par exemple les dépôts sédimentaires face à un point de rejet, jusqu'au schéma directeur départemental du curage de canaux).

La représentativité horizontale de l'échantillonnage est gouvernée par le positionnement et la densité des stations de prélèvement qui dépendent des spécificités propres aux opérations et travaux sur sédiment.

La littérature propose plusieurs méthodes pour positionner des stations de prélèvement selon différents types de milieux (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Parmi celles-ci, les méthodes dites aléatoires, ciblées et statistiques sont les plus répandues et permettent d'orienter le Maître d'Ouvrage.

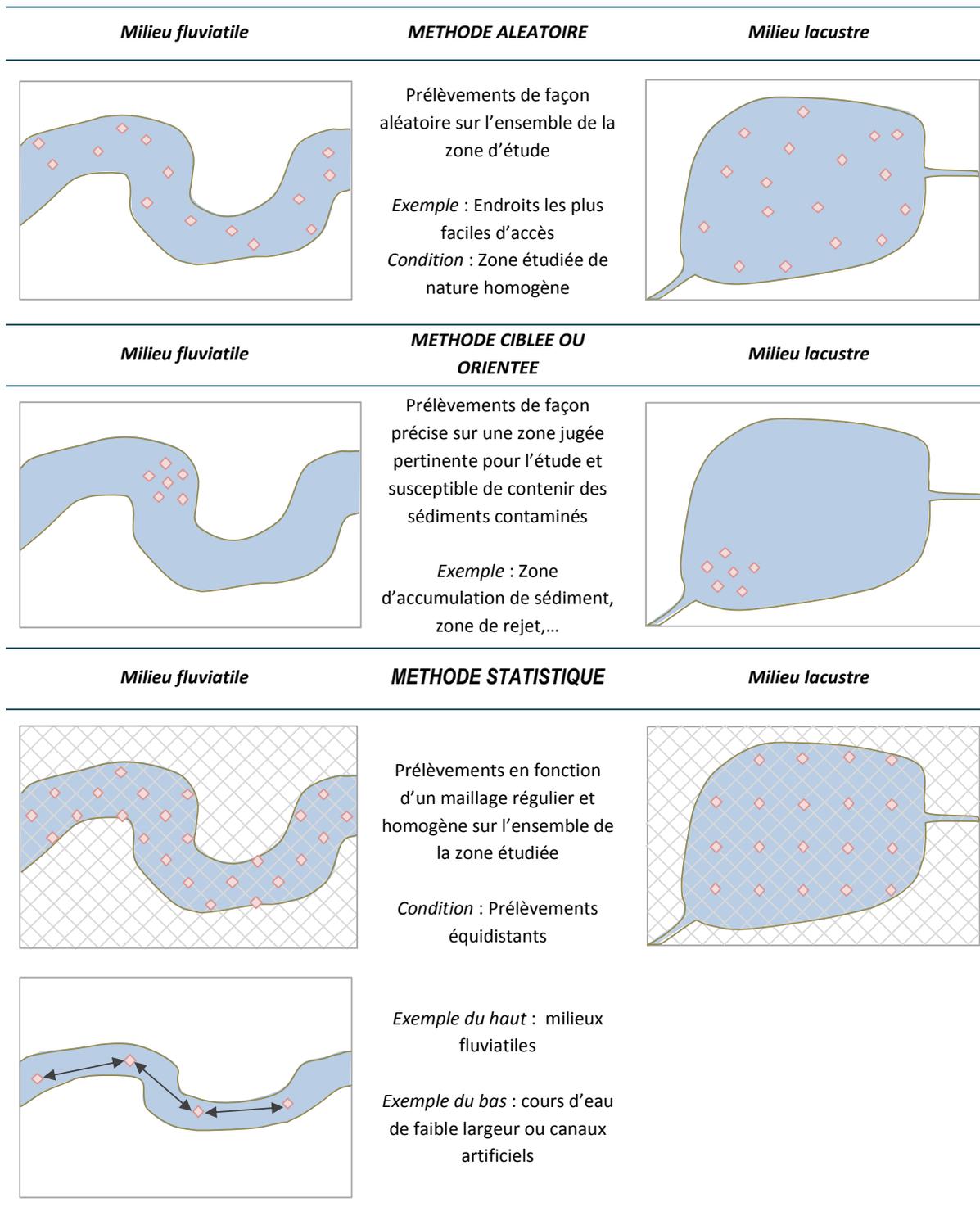


Figure 83 : Principales méthodes de positionnement des stations de prélèvement

Nota : pour un projet donné, le couplage de ces différentes approches (méthodes combinées) est parfois nécessaire pour rendre compte de l'hétérogénéité de la zone d'étude.

Sur le terrain : Les coordonnées géographiques des stations doivent être enregistrées systématiquement après chaque prélèvement. L'utilisation d'un GPS permet d'atteindre le degré de précision habituellement attendu de ± 10 m (diamètre du cercle figurant la station de prélèvement). Il est cependant préférable d'avoir recours à un GPS différentiel de précision inframétrique.

En l'absence de prescriptions réglementaires, l'effort d'échantillonnage à prévoir s'apprécie en premier lieu au regard des critères suivants :

<p>Objectifs du projet :</p> <ul style="list-style-type: none">- L'objet de l'étude : curage d'entretien, surveillance du milieu, projet d'aménagement ;- Volume de sédiment potentiellement mobilisable ;- Le niveau de précision recherché pour caractériser le massif (du pré-diagnostic au diagnostic approfondi)
<p>Zone d'étude :</p> <ul style="list-style-type: none">- Etendue du projet (surface concernée m²/ha, km²),- Typologie du milieu : dépôts homogène/hétérogène, zone ouverte (eau libre) ou confinée (darse)- Contexte hydrodynamique ;- Les sources d'apports dans le milieu ;- Données historiques : connaissance <i>a priori</i> du gisement (analyses antérieures, suivis...), degré de remaniement, plan d'aménagement.
<p>Contraintes de terrain et d'analyse :</p> <ul style="list-style-type: none">- Volume à collecter ;- Contraintes d'accès et contraintes matériel ;- Contrainte budgétaire du diagnostic.

Tableau 15 : Ajustement du nombre de station en fonction du niveau de contamination

b) Représentativité verticale

La représentativité verticale des sédiments vise à caractériser les strates sédimentaires représentatives du projet (prélèvements de surface et/ou en profondeur).

Les prélèvements sur toute la hauteur du massif ne sont pas toujours indispensables, comme par exemple sur des opérations impliquant une remobilisation des premiers centimètres du sédiment superficiel (10 à 15 cm maximum), à l'instar des projets de battage de palplanches, de curage d'entretien régulier, ou de suivi qualitatif du milieu sédimentaire.

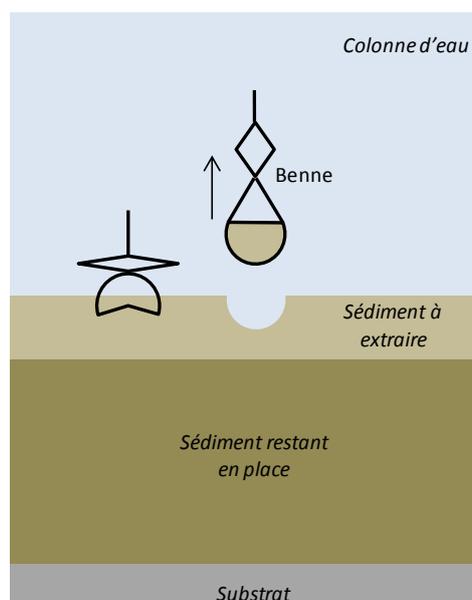


Figure 84 : Schéma de principe d'un prélèvement de sédiment superficiel.

A contrario, les opérations impliquant des épaisseurs de sédiment importantes nécessitent d'évaluer l'état de contamination du gisement sur toute sa composante verticale (dragage, vidange de barrage).

Il est recommandé également sur les dépôts anciens, témoins d'une pollution historique, de connaître la qualité des matériaux restant en place à l'issue du projet (curage d'approfondissement, opération de dépollution). Cette démarche est à même de renseigner un Maître d'Ouvrage sur les risques de dégradation du milieu et des objectifs de bon état écologique à atteindre dans le cadre de la DCE.

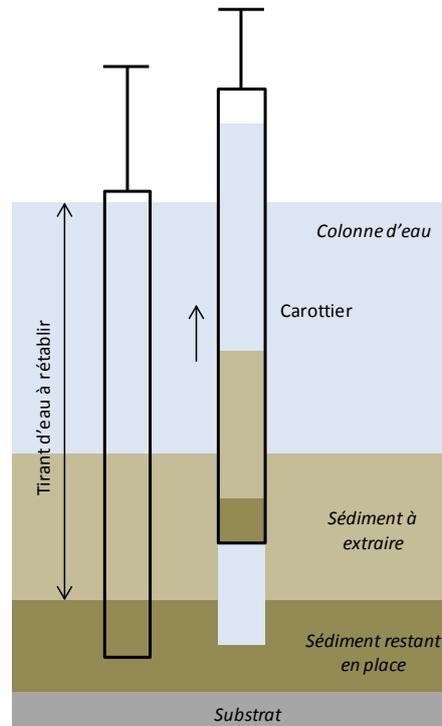


Figure 85 : Schéma de principe d'un prélèvement carotté de sédiment.

A14.2.2 - Constitution d'un échantillon

c) Réalisation d'un échantillon ponctuel

Un échantillon ponctuel (ou échantillon premier) est issu d'une seule et même station de prélèvement, mais devrait être systématiquement obtenu à partir de plusieurs prélèvements successifs pour augmenter la représentativité du contexte sédimentaire local.

L'analyse d'un échantillon ponctuel est mise en œuvre lorsque l'on cherche à diagnostiquer plus finement un gisement sédimentaire sur une zone donnée (méthode d'échantillonnage ciblée).

Sur le terrain : Au préalable, chaque station de prélèvement recevra un nom ou un numéro pour faciliter la prise de note sur le terrain, l'étiquetage et le suivi des échantillons.

d) Réalisation d'un échantillon moyen

La réalisation d'un échantillon moyen (ou échantillon composite) peut s'avérer nécessaire lorsque l'on cherche à caractériser une situation moyenne, par exemple lorsque la zone d'étude est relativement étendue (curage d'entretien sur un linéaire important et homogène). Les échantillons moyens sont généralement obtenus à partir de trois échantillons ponctuels.

Sur le terrain : Il convient de s'assurer de ne pas réitérer un prélèvement sur un même emplacement pour éviter l'échantillonnage d'un sédiment déjà remanié.

La constitution d'un échantillon moyen à partir d'échantillons ponctuels très différents (texture, granulométrie,...) est fortement déconseillé car peu représentative d'un seul et même faciès de dépôt. Dans ce cas, l'analyse séparée des échantillons ponctuels est une solution, avant de revoir le plan d'échantillonnage.

e) Exemple d'application

Les deux modes d'échantillonnages précités peuvent être utilisés en concomitance sur un même projet. La figure suivante illustre l'approche d'échantillonnage mise en œuvre dans le cadre des opérations prévisionnelles de curage des ports du Lac du Bourget. La démarche a consisté à diagnostiquer la qualité des sédiments en se basant sur la distribution des volumes de sédiment portuaire à l'échelle du projet (médiane $\approx 500 \text{ m}^3$) :

- Cas n°1 : Volume de sédiment à curer $< 500 \text{ m}^3$;
- Cas n°2 : Volume de sédiment à curer $> 500 \text{ m}^3$.

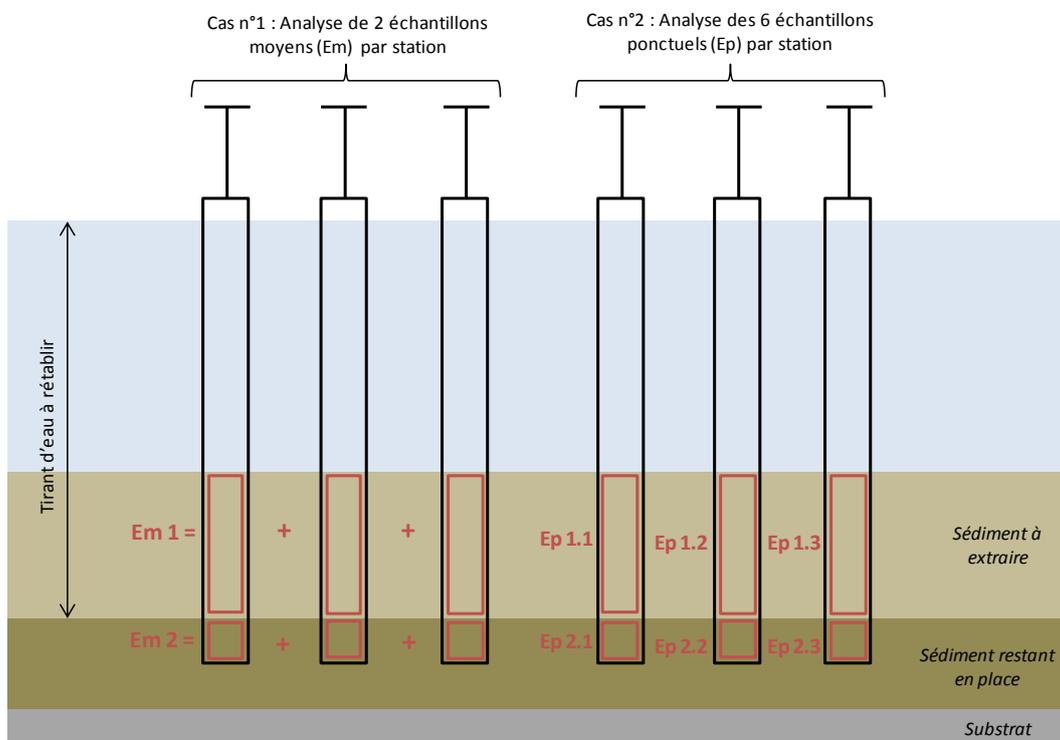


Figure 86 : Exemple de stratégie d'échantillonnage de sédiment portuaire [CALB/IDRA]

f) Fiche de prélèvement

Les prélèvements sont déposés indemnes dans un réceptacle (goulotte inox par exemple) pour y être détaillées et photographiées. L'ensemble des données recueillies est consigné au sein d'une fiche descriptive qui fait apparaître les éléments suivants :

- Les références et les coordonnées géographiques du point de prélèvement ;
- Les dates et heures du prélèvement ;
- Le nom du ou des opérateurs sur site ;
- Les moyens de prélèvements utilisés ;
- Les hauteurs de sédiments échantillonnés ;
- La nature, la couleur et la structure du prélèvement (constat organoleptique) ;

...



Un exemple de fiche terrain est proposé au sein de la « **Fiche Prélèvement** ».



De même, les « **Fiches Milieux** » détaillent les principaux types de milieux rencontrés et les stratégies à adopter :

- *Barrage / retenue hydraulique ;*
- *Canaux navigables*
- *Ruisseaux ;*
- *Fleuve : marges alluviales (casier Girardon, atterrissement en berge).*

g) Conditionnement et transport des échantillons

Entre chaque prélèvement, il convient de s’assurer d’un nettoyage rigoureux du matériel, avec l’eau du site ou avec de l’eau déminéralisée, pour limiter les risques de contamination des échantillons. Ceci est particulièrement vrai pour les outils de prélèvement et de conditionnement (cuillère ou spatule au revêtement non altéré).

Les échantillons de sédiment seront conditionnés dans des récipients 1 à 2 litres en verre ou en matériaux polymères (polyéthylène, polypropylène ou polystyrène cristal).

Dans le cadre de l’analyse d’échantillons moyens, il est fortement recommandé de procéder aux phases de mélange et d’homogénéisation des échantillons ponctuels en laboratoire. Sur le terrain, les sources de contamination sont trop importantes et les proportions volumiques de chaque échantillon ponctuel difficilement appréciables pour garantir la juste représentativité de l’échantillon moyen.

Les échantillons de sédiment doivent être impérativement transportés au laboratoire dans les 24 heures suivant la phase de prélèvement. Les flacons référencés selon le plan d’échantillonnage seront maintenus, lors du transport, à l’abri de la lumière et à une température comprise entre 2°C et 8°C (NF EN ISO 5667-15, 2009). L’utilisation d’une glacière isotherme (ou électrique) et de blocs réfrigérants permettront de garantir ces conditions de transport.

Au laboratoire, la durée de stockage des échantillons devra être réduite au maximum avant de porter les analyses et particulier les tests écotoxicologiques. A titre indicatif, les prescriptions de stockage sont détaillées dans le tableau ci-après :

<i>Paramètres</i>	<i>Durée de stockage</i>	<i>Conditions de stockage</i>
Analyse chimiques sur sédiment brut	2 semaines max	Conservation à l’obscurité dans un réfrigérateur à 4 ± 2°C
	6 mois max	Conservation à l’obscurité dans un congélateur à -20°C
Analyse chimique sur eau interstitielle	Procéder aux analyses immédiatement pour éviter toutes transformations physico-chimiques	
Test écotoxicologique	2 semaines max	Conservation à l’obscurité dans un réfrigérateur à 4 ± 2°C

Tableau 16 : Conditions et durée de stockage au laboratoire [d’après Env. Canada]

h) Démarche qualité

Dans la chaîne de mesure de la qualité des sédiments potentiellement contaminés, l’étape d’échantillonnage est le premier maillon qui peut introduire une erreur importante. Il est donc primordial d’opérer avec le plus grand soin et de s’assurer que le personnel préleveur justifie d’une formation et de l’expérience suffisante en la matière.

Il n'existe pas pour l'instant d'accréditation spécifique pour les prélèvements de sédiment. L'accréditation COFRAC¹⁹ concerne les prélèvements d'eau et est généralement réservée aux laboratoires et aux unités de prélèvements associées. Une norme (ISO 5667-12) spécifique aux sédiments est à ce jour à l'étude [AFNOR].



A défaut de justificatifs normalisés, un plan d'assurance qualité peut être demandé aux prestataires pour la mission de prélèvement (cf. Fiche « PAQ »).

Le prestataire réalisant les prélèvements ou le laboratoire sous-traitant doit idéalement conserver un double de chaque prélèvement réalisé sur le terrain. Cette étape, qui nécessite certes un effort supplémentaire d'échantillonnage en terme de volume, est réalisée avec deux objectifs différents :

- A des fins de contrôle de la prestation, par la réalisation d'analyses en double, soit dans le même laboratoire (réplicabilité), soit dans deux laboratoires différents (reproductibilité). Une comparaison statistique inter-stationnelle devient alors possible (calcul d'un écart-type,...) ;
- Dans le cadre d'analyse d'échantillons moyens pour déceler dans des échantillons premiers conservés une origine plus précise de la contamination.

A14.2.3 - Exemples de stratégies d'échantillonnage

En l'absence de réglementation, des Maîtres d'Ouvrage comme la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) et les Voies Navigables de France (VNF) ont développé en interne des protocoles sur le nombre de stations et d'analyses à réaliser dans le cadre de leurs activités.

i) Protocole d'échantillonnage Compagnie Nationale du Rhône (CNR)

La CNR propose un nombre de station de prélèvement en fonction des volumes de sédiment à curer. Les analyses associées aux prélèvements dépendront des épaisseurs de matériaux en jeu (échantillonnage séquentiel).

<i>Volume de matériaux à extraire (m³)</i>	<i>Nombre de stations</i>	<i>Epaisseur du sédiment (m)</i>	<i>Nombre d'échantillons à analyser</i>
2 000 à 10 000	1	0 - 1	1
10 000 à 20 000	2	1 - 2	2 (1 surface / 1 fond)
20 000 à 40 000	3	2 - 4	3 (1 surface / 1 milieu / 1 fond)
40 000 à 80 000	4	4 - 8	4 (1 surface / 2 milieu / 1 fond)
80 000 à 160 000	5	+ 8	5 (1 surface / 3 milieu / 1 fond)
> 160 000	6		

Tableau 17 : Protocole d'échantillonnage de la CNR

¹⁹ COFRAC : COmité FRançais d'ACccréditation

j) Protocole d'échantillonnage VNF

Le protocole VNF fournit un nombre d'analyses à lancer en fonction des volumes de sédiment en jeu et du contexte rural ou urbain (présomption de pollution). VNF précise que les analyses portent sur toute l'épaisseur du sédiment à curer.

	CONTEXTE RURAL	CONTEXTE URBAIN
<i>Volume de matériaux à extraire (m³)</i>	<i>Nombre d'échantillons à analyser</i>	
< 25 000	Au minimum 1 échantillon par tranche de 10 000 m³	Au minimum 1 échantillon par tranche de 5000 m³
> 25 000	Au minimum 3 échantillons, puis 1 échantillon par tranche de 20 000 m³	Au minimum 5 échantillons, puis 1 échantillon par tranche de 10000 m³
	Exemple : 13 000 m ³ → 2 échantillons minimum	Exemple : 13 000 m ³ → 2 échantillons minimum

Tableau 18 : Protocole d'échantillonnage VNF [VNF, 2011]

Concernant le nombre exact de prélèvement, VNF suggère de l'adapter en fonction du contexte local. La suspicion d'une zone contaminée (accumulation de sédiment, présence de rejets,...) impose une analyse de chaque prélèvement. A l'inverse, l'analyse d'un échantillon moyen constitué de plusieurs prélèvements ponctuels (3 généralement) est acceptable sur la zone d'étude exempte de contamination *a priori*.

k) Proposition de stratégie d'échantillonnage

Compte tenu de la multitude de situations possibles et de la complexité de certains projets, il est difficile, voire illusoire, de proposer une « doctrine » d'échantillonnage à appliquer en routine. Bien souvent une adaptation au cas par cas est nécessaire. Néanmoins, des points de convergence identifiés dans la littérature (critères discriminants du volume, du contexte, et de la profondeur de sédiment remobilisé) permettent de proposer ici une approche à destination des maîtres d'ouvrage ou services de l'état sur laquelle s'appuyer.

La stratégie s'appuie en premier lieu sur le protocole d'échantillonnage VNF à la différence près qu'elle n'indique non pas un nombre d'analyses à lancer mais un nombre de stations de prélèvement à considérer, en fonction des volumes de sédiment en jeu (*Tableau 19*).

<i>Volume de matériaux à extraire (m³)</i>	<i>Nombre de station de prélèvement</i>
< 2 000	1
2 000 à 10 000	2
10 000 à 25 000	4
25 000 à 50 000	6
> 50 000	6 + 1 par tranche de 10 000 m ³ supplémentaire

Tableau 19 : Nombre de station de prélèvement

Le nombre de stations sera adapté par le Maître d’Ouvrage sur la base de ses connaissances du milieu et en particulier de la présomption d’une contamination. Le *Tableau 20* ci-dessous propose 3 facteurs multiplicatifs pour ajuster le nombre de station (n) à échantillonner en fonction du niveau de connaissance du site (degré de contamination pressenti du milieu, historique... cf.).

Volume de matériaux à extraire (m ³)	Niveau de connaissance du site		
	Bon (n x 1)	Moyen à faible (n x 2)	Nul (inconnu) (n x 3)
< 2 000	1	2	3
2 000 à 10 000	2	4	6
10 000 à 25 000	4	8	12
25 000 à 50 000	6	12	18
> 50 000	6 + 1 par 10 000 m ³ supplémentaire	(6 + 1 par 10 000 m ³ supplémentaire) x2	(6 + 1 par 10 000 m ³ supplémentaire) x3

Tableau 20 : Ajustement du nombre de stations en fonction du niveau de contamination

Certains contextes sédimentaires sont très peu propices à la contamination (par ex. les plages de dépôts grossiers torrentiels – *ONF RTM de l’Isère*), la nécessité de porter une analyse physico-chimique apparaît très peu justifiée.

Sur le terrain : Il est recommandé de réaliser plusieurs prélèvements ponctuels par station (3 généralement) pour constituer un échantillon moyen à analyser en laboratoire (cf. *Chap. A14.2.2 -*).

Selon le degré de précision recherché, le Maître d’Ouvrage pourra également analyser chaque prélèvement ponctuel pour densifier le nombre de stations et ainsi augmenter la représentativité horizontale du plan d’échantillonnage.

Enfin, il est important également de tenir compte des épaisseurs de sédiment en jeu et de procéder à un sous échantillonnage (moyen ou non) pour analyser l’ensemble des strates représentatives du projet (*Tableau 21*).

Epaisseur du sédiment (m)	Nombre d’échantillons à analyser
0 - 1	1
1 - 2	3
2 - 4	4
4 - 6	6
> 8	8 (+1 par tranche de 1 m supplémentaire)

Tableau 21 : Nombre d’échantillon à réaliser en fonction des épaisseurs de sédiment en jeu

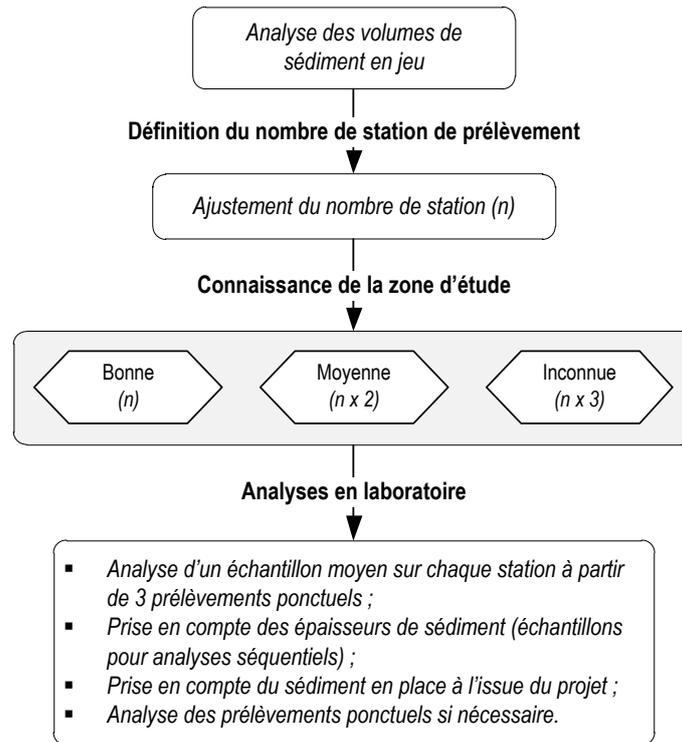


Figure 87 : Logigramme récapitulant la stratégie d'échantillonnage

1) Volume de sédiment à prélever

Sur le terrain : Les quantités de sédiment à collecter sont édictées par les besoins affichés par les laboratoires d'analyses. A titre indicatif, les volumes couramment demandés sont présentés dans le tableau suivant :

	Volume moyen à collecter
Analyses physico-chimiques sur brut	
Contaminants inorganiques (ETM)	
Contaminants organiques (PCB)	
Autres paramètres (COT, teneur en eau, densité...)	1 L
Granulométrie	
Hydrocarbures (HCT, HAP)	0,5 à 1 L
Essais biologique (tests d'écotoxicité, bioaccumulation)	1 à 3 L
Extraction de l'eau porale	2 L
Préparation d'un éluat	1 L

Tableau 22 : Volume de l'échantillon requis pour porter les analyses physico-chimiques [d'après ENV. CANADA, 1994 et échanges laboratoires]

On relèvera cependant qu'en cas de prélèvement sur une station pauvre en matériaux fins (la fraction sédimentaire limono-argileuse <63 µm est la plus propice à fixer les contaminants), le volume à collecter avant tamisage peut rapidement devenir rédhibitoire.

De plus, la manipulation sur le terrain (tamisage), donc en dehors de tout contexte de laboratoire, est à proscrire autant que possible pour ne pas risquer de dénaturer les échantillons (lessivages des particules, resolubilisation des contaminants associés). Les points suivants doivent donc être soulevés :

- i) *y-a-t-il possibilité de déplacer la station, tout en restant dans le champ du projet ?*
- ii) *si aucun faciès d'accumulation ne permet de répondre à ces conditions, l'incidence du projet devient négligeable au regard des risques associés à la qualité physico-chimique des sédiments remobilisés. Le diagnostic peut légitimement être simplifié sur le secteur concerné.*
- iii)

A14.2.4 - Moyens de prélèvement

Les trois principaux moyens de prélèvement sont basés sur le principe de fonctionnement de la drague, de la benne et du carottier.

Les modèles de drague et bennes, relativement faciles à utiliser, conviennent à la plupart des substrats et sont relativement économiques. Elles permettent un échantillonnage du **sédiment superficiel**.

Les modèles de carottiers sont nombreux et utilisés préférentiellement pour obtenir un échantillon peu ou non dénaturé du sédiment (**prélèvement carotté**). Ils permettent ainsi de bien appréhender la représentativité verticale du massif sédimentaire et limitent les biais de mesures associés à remobilisation de la matrice sédimentaire.

Le choix d'un moyen de prélèvement par rapport à un autre dépend des objectifs de l'étude et des exigences du terrain. Sa sélection passe par l'analyse des éléments de décision suivants :

- *Quel est le milieu d'intervention ? Eau douce, estuaire, marais, port, rivière, lac,...*
- *Quelles sont les conditions de terrain ? Profondeur, courant, embarcation, accès à pied,...*
- *Quels sont les moyens mis en œuvre ? Potence de relevage, treuil, mains,...*
- *Quel est la nature des sédiments ? Indurés, meubles, fraction en cailloutis ou en matériaux grossier, végétation,...*

m) Prélèvement des sédiments superficiels

▪ *Raclette à sédiment*

La raclette est adaptée pour prélever les premiers centimètres du sédiment (crème de vase ou « couche néphéloïde »), en particulier dans le cas de diagnostics aux interfaces d'échanges eau/sédiment. L'eau surnageant est évacuée grâce à de petits trous situés à son extrémité. Son utilisation est simple mais fait appel à des plongeurs expérimentés.

Ses limites d'utilisation sont celles de la plongée : contrainte de profondeur, sécurité de l'intervention, turbidité de l'eau et courants.



Figure 88 : Raclette à sédiments.

▪ *Benne Eckman*

Cette benne légère est destinée aux prélèvements de vases meubles sur une épaisseur d'environ 10 cm. Elle est équipée d'une boîte de section carrée en acier inoxydable avec deux mâchoires fermantes. Lorsque la benne touche le fond, les mâchoires sont déclenchées grâce à la chute d'un messageur sur la ligne de suspension.

Son principal inconvénient est de perdre son contenu à la remontée si un élément plus grossier obstrue ses mâchoires (végétaux, cailloutis).



Figure 89 : benne Eckman.

▪ *Benne Van Veen*

Elle convient à la plupart des substrats (vase meuble, vase compacte, sable et cailloutis) et permet des prélèvements sur 10 à 30 cm d'épaisseurs selon sa taille.

Sa construction simple et robuste facilite son utilisation en eau profonde et dans le courant. Au contact du fond, un loquet se désengage et libère les mâchoires qui se referment par rapprochement des bras de leviers.

Il convient de signaler que l'onde de choc à la descente peut perturber les sédiments fins (crème de vase) et qu'à la fermeture, le prélèvement déstructure les horizons de dépôt des sédiments. Les teneurs en eau du sédiment prélevé restent proches des matériaux en place.



Figure 90 : Benne Van Veen.

Moyen	Milieu d'intervention	Épaisseurs prélevées (cm)	Volumes prélevés (litre)	Sédiments	Déstructuration de l'échantillon	Coûts
Raclette à sédiment	Fluviale et lacustre en plongée	1 - 3	0,5 - 1	Vase fluide, crème de vase	Faible	Modéré (plongeurs)
Benne Eckman	Fluviale et lacustre en eaux profondes (>30m)	10	1 - 4	Vases meubles, sables fins	Moyenne	Faible
Benne Van Veen	Fluviale et lacustre en eaux profondes et par courant	10 - 30	2 - 10	Vases meubles et compactes, sables, petits cailloutis	Moyenne	Faible

Tableau 23 : Synthèse des principaux moyens de prélèvements des sédiments de surface

n) Prélèvement des sédiments par carottage

- *Carottier de plongée*

Ce dispositif permet de prélever des carottes de 20 à 80 cm selon le degré de consolidation des sédiments. Les échantillons sont collectés dans un tube transparent qui retient le matériau dans sa position originale et qui permet une description claire des profils sédimentaires. Son coût est relativement faible (tube en PVC) mais son utilisation est limitée par les contraintes en plongée : profondeur, turbidité de l'eau et courants.



Figure 91 : Carottier de plongée

- *Carottier inox à main*

Il est efficace pour prélever des carottes de sédiment meuble et plus compact sur des épaisseurs de 50 à 200 cm. Le tube est en acier inoxydable (longueur de 2 m avec rallonge possible à 3 m par manchon de vissage) et équipé à son extrémité de poignées pour faciliter sa pénétration dans les sédiments consolidés et parfois d'une trousse coupante. Il est destiné à un usage en eaux peu profondes dans lesquelles on peut évoluer à pieds ou sur une embarcation si l'on dispose de rallonge (hauteur d'eau maximum 7 mètres). Simple d'utilisation, il faut toutefois le manœuvrer avec soin pour empêcher les sédiments les moins cohésifs de s'échapper à la remontée (effet de chasse).



Figure 92 : Carottier inox à main

- *Carottier gravitaire*

Il permet de réaliser des échantillons de 50 à 150 cm de sédiment compact relativement peu remaniés (compaction des couches supérieures pouvant atteindre un facteur 2). Son tube est équipé d'ailerons pour stabiliser sa chute libre en position verticale et facilite ainsi sa pénétration dans les sédiments. Le carottier gravitaire est utilisé lorsque les prélèvements au carottier à main posent problèmes à cause d'une trop grande profondeur d'eau et/ou d'un courant trop fort. Sa manipulation est délicate et nécessite une capacité de levage (treuil) adaptée à son poids élevé (30 à 50 kg).



Figure 93 : Carottier gravitaire

Remarque : Il existe d'autres modèles de carottier gravitaire (type « Kullenberg ») généralement mise en œuvre dans le cadre de missions océanographiques (étude lithologique, évaluation des ressources du sous-sol,...). Ils sont constitués d'un tube métallique long (> 5m) et fortement lestés (> 200 kg). La longueur du tube est adaptée en fonction de la nature des fonds : plus le substrat est dur, plus la longueur du tube sera courte, afin d'éviter la casse du matériel [IFREMER]. En milieu continental, son utilisation s'avère intéressante dans le cadre d'un diagnostic sédimentaire en pied de barrage (profondeur élevée, envasement important).

- *Carottier poinçonneur*

Les prélèvements carottés peuvent atteindre plusieurs mètres (jusqu'à 8 m d'épaisseur) selon les objectifs de sondage et la nature des fonds rencontrés. Les échantillons de sédiment sont conservés intacts sous gaine PVC (tubage sur la hauteur d'eau et à l'avancement des sondages). Sur le terrain, le carottier poinçonneur est chargé sur un ponton flottant ce qui exige une main d'œuvre conséquente et un temps d'intervention plus long.



Figure 94 : Carottier poinçonneur

- *Carottier à boîte « box-corer »*

Ce dispositif est peu connu en France mais il allie les avantages de la benne et ceux du carottier. Il est muni d'une boîte cubique (50 cm x 50 cm x 50 cm de profondeur) et permet de prélever des échantillons non remaniés, en s'enfonçant par gravité dans le sédiment meuble. A la remontée, la boîte est refermée par un système de couteau qui encapsule un bloc de sédiment.

Sa manipulation est délicate et nécessite une capacité de levage (treuil) adaptée à son poids élevé (environ 50 kg).



Figure 95 : Carottier à boîte « box-corer »

Moyen de prélèvements	Milieu d'intervention	Épaisseurs prélevées (cm)	Volumes prélevés (litre)	Sédiments	Déstructuration de l'échantillon	Coûts (mobilisation et matériel)
Carottier de plongée	Fluviale et lacustre en plongée	20 - 100	0,5 - 2	Vases meubles	Faible	Modéré (plongeurs)
Carottier à main	Fluviale et lacustre en eaux peu profondes et par faible courant (> 8 m)	50 - 200	0,5 - 4	Vases meubles et compactes	Faible	Faible
Carottier gravitaire	Fluviale et lacustre en eaux profondes (< 8 m)	50 - 150	1 - 3	Vases meubles et compactes	Moyenne en surface (compaction)	Modéré (exige un treuil)
Carottier poinçonneur	Fluviale et lacustre en eaux profondes	> 200	> 4	Vases meubles et compactes, sables, cailloutis	Faible	Elevé (moyen humain et technique)
Box-corer	Fluviale et lacustre en eaux profondes (< 8 m)	50	> 30	Vases meubles et compactes	Faible	Modéré (exige un treuil)

Tableau 24 : Synthèse des principaux moyens de prélèvements des sédiments de surface

o) Sélection d'un moyen de prélèvement

Il est recommandé de privilégier un moyen de prélèvement qui ne déstructure que faiblement les matériaux à échantillonner. En effet, une perturbation de la structure du sédiment entraîne inévitablement des modifications sur ses caractéristiques physico-chimiques et biologiques.

Les prélèvements carottés, comme souligné dans l'Arrêté du 30 mai 2008²⁰, semblent plus en adéquation avec la recommandation précitée, toutefois ils présentent certains inconvénients :

- Les couches superficielles du sédiment sont perturbées lors de l'enfoncement (phénomène de compaction), le diamètre doit donc être suffisamment important pour éviter les effets de bords ;
- Les tubes en acier présentent des risques de contamination pour les échantillons (analyses des Eléments Traces Métalliques) ;
- Les volumes de sédiment échantillonné sont généralement plus faibles et exigent des prélèvements répétitifs qui se répercutent rapidement sur le temps et les coûts de mobilisation des équipes terrains.

Remarque : D'autres moyens de prélèvement plus spécifiques peuvent être mobilisés selon les enjeux de prélèvement et les contraintes du site (carottier Beeker, benne Ponar, benne Shipeck,...).

La stratégie des méthodes d'échantillonnage peut être résumée à travers le logigramme suivant.

²⁰ Arrêté du 30 mai 2008 fixant les prescriptions générales applicables aux opérations d'entretien de cours d'eau et canaux soumis à autorisation ou à déclaration en application du code de l'environnement

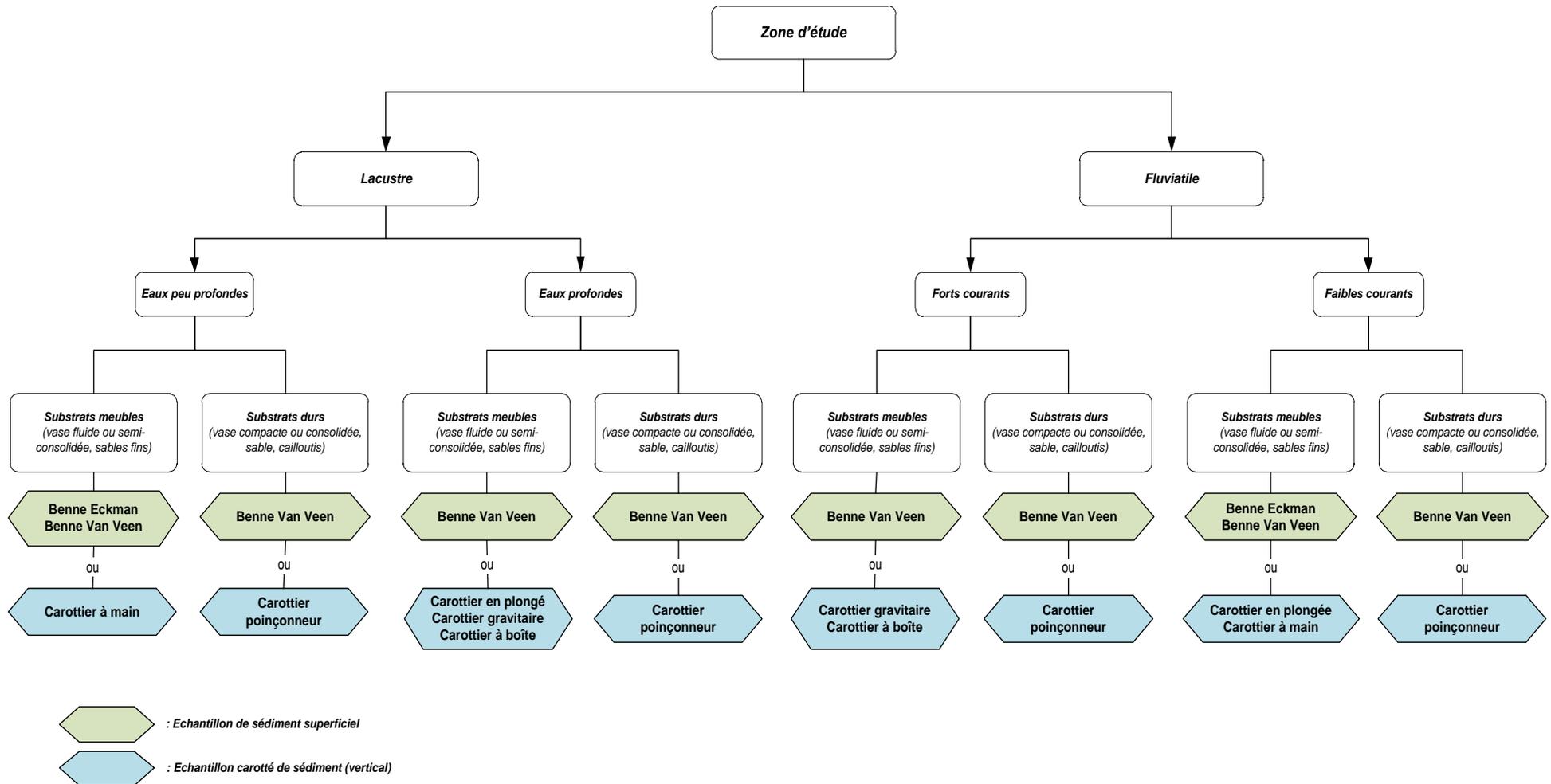


Figure 96 : Moyens de prélèvement recommandés pour différents types de milieux [d'après Env. CANADA modifié]

p) Autres moyens à mobiliser

Outre le matériel de prélèvement, la qualité des prélèvements est souvent dictée par la dextérité des préleveurs mais aussi par les moyens de navigation mobilisés. Le maître d'ouvrage doit s'assurer dans sa consultation que ceux-ci soient pertinents, c'est-à-dire dimensionnés pour le matériel de prélèvement et le personnel sur site, mais aussi adapté aux conditions du milieu.

L'intervention en cours d'eau amène parfois à manœuvrer avec des hauteurs d'eau limitées précisément sur les zones d'accumulation des massifs sédimentaires. Dans ce cas, l'usage d'embarcation à faible tirant d'eau est nécessaire (coque fond plat, barge légère). A contrario, les prélèvements nécessitant des carottages profonds impliquent des embarcations plus lourdes pour garantir la stabilité du matériel et la sécurité du personnel.



Figure 97 : Quelques exemples de moyens de navigation mobilisables et d'un ponton flottant [CNR, IDRA]

A15 - FICHE PRÉLÈVEMENT

(à faire)

Cette fiche sera à remplir sur site par l'opérateur du prélèvement.

A16 - ANALYSES EN LABORATOIRE

A16.1 - RAPPEL SUR LES ACCRÉDITATIONS DES LABORATOIRES

Il est fortement recommandé au Maître d’Ouvrage de mandater un laboratoire agréé par le Ministère chargé de l’Environnement (Arrêté du 12 novembre 1998 portant modalités d’agrément des laboratoires, modifié par Arrêté du 27 octobre 2011)

Remarque : Pour un couple paramètre-matrice donné, l’agrément délivré par le ministère est conditionné par le fait que le laboratoire est accrédité au titre de la NF EN ISO/CEI 17025 par le COFRAC pour ce couple paramètre/matrice. Les agréments ministériels sont aujourd’hui fixés pour un couple paramètre-matrice et non plus pour un « lot » de paramètres. Pour la matrice sédimentaire, les agréments ministériels sont en cours de validation, en l’absence de limites de quantification proposés [Avis du MEDD, NOR DEVL1131786V, JORF 21 janvier 2012].

Lien agrément ministériel : <http://www.labeau.ecologie.gouv.fr/index.php>

A16.2 - PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS AU LABORATOIRE

Au laboratoire, le prétraitement des échantillons est une source de biais de mesures non négligeable, comparable à celles rencontrées sur le terrain lors de la manipulation des échantillons (cf. Chap.). Les phases de prétraitement sont récapitulées dans le logigramme suivant.

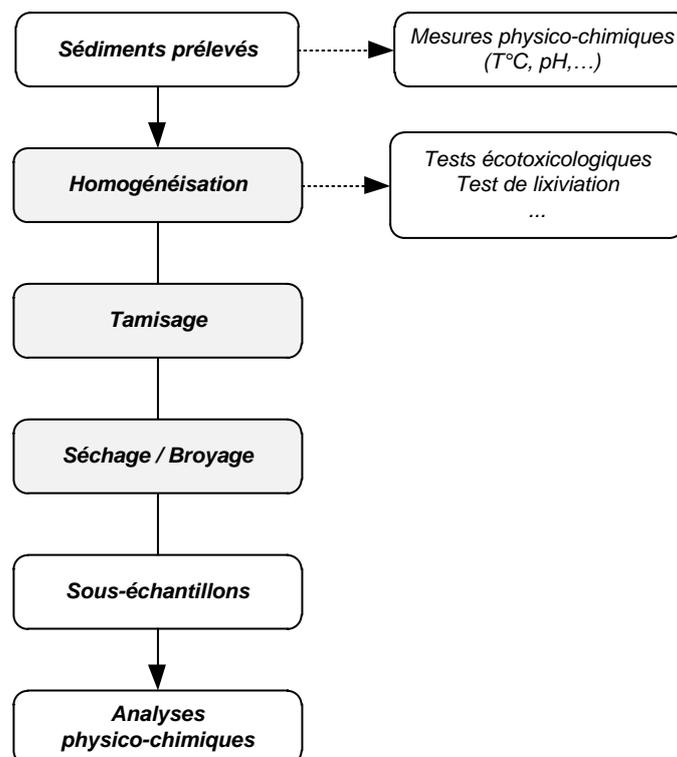


Figure 98 : Logigramme récapitulant les étapes de prétraitement

Remarque : Le transport des échantillons jusqu’au laboratoire peut modifier considérablement les paramètres physico-chimiques du sédiment. Ainsi, les mesures physico-chimiques à l’interface sédiment-eau (T°, pH, potentiel d’oxydoréduction,...) doivent être enregistrés directement à l’issu du prélèvement.

A16.2.1 - Phase d'homogénéisation

Les échantillons de sédiment sont dans un premier temps homogénéisés. Cette étape est essentielle pour obtenir un résultat représentatif de l'échantillon, qui plus est lorsque la prise d'essai pour l'analyse n'est que de quelques grammes (Tableau 26).

Paramètres	Quantité optimale requise (g)
Granulométrie	250
Carbone Organique Total	800
Composés azotés ou phosphorés	750
Eléments Traces Métalliques	375
HAP	375
PCBi	600
Test de lixiviation	2 000
Test écotoxicologique Brachionus	100
Test H14	10 000 – 20 000

Tableau 25 : Quantité optimale requise de sédiment pour lancer les analyses [échanges laboratoires]

Remarque : Pour l'analyse d'un échantillon moyen, la méthode consiste à réunir la même proportion volumique de chaque échantillon ponctuel. Ce dernier est alors soumis à une opération de quartage pour diminuer son volume tout en conservant sa représentativité (Figure 100). Il est recommandé de réaliser cette opération au laboratoire pour s'affranchir des contraintes de terrain (cf. Chap.).

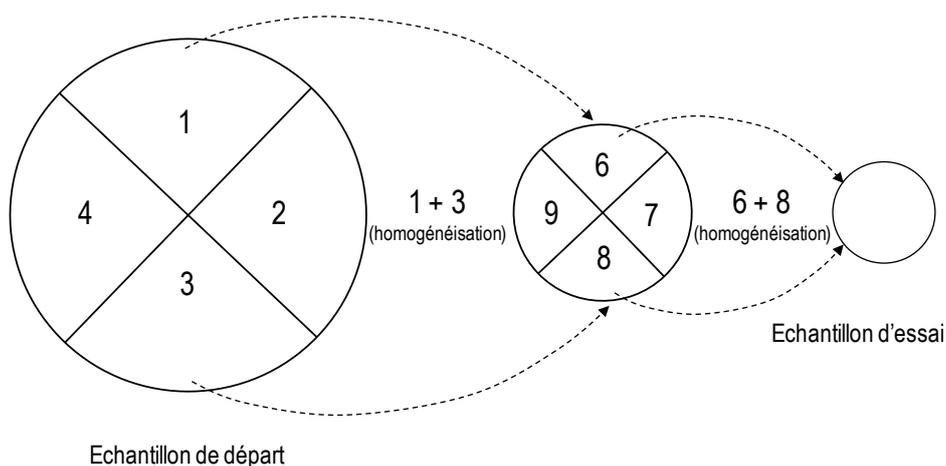


Figure 99 : Schéma d'une opération de quartage

Le temps d'homogénéisation devra être réduit au minimum afin de ne pas altérer d'avantage l'intégrité du prélèvement (partition granulométrique faussée, oxygénation prolongée,...). Elle est réalisée manuellement ou mécaniquement jusqu'à l'obtention d'un sédiment d'une texture et d'une couleur homogène.

Il convient de noter que des sous échantillons pourront être confectionnés pour réaliser d'autres types d'analyses (tests écotoxicologiques, test de lixiviation,...). Dans ce cas, les étapes de prétraitement sont spécifiques aux protocoles analytiques.

A16.2.2 - Phase de tamisage

Les laboratoires assurent un tamisage à sec inférieur à 2 mm pour les échantillons destinés aux analyses physico-chimiques. Cette étape permet de se concentrer sur la fraction granulométrique de l'échantillon en deçà de laquelle les contaminants sont les plus à même de se fixer.

Le tamisage assure également l'enlèvement des organismes inféodés, végétaux et tous autres débris dans les échantillons avant analyse. Leurs effets sur les caractéristiques physico-chimiques et biologiques des sédiments restent inconnues, néanmoins certains organismes peuvent affecter directement ou indirectement les résultats de test écotoxicologique (notion d'espèces concurrentes).

A16.2.3 - Phase de séchage et de broyage

En dernière étape, les échantillons subissent successivement une phase de séchage et de broyage. Le protocole de séchage est celui des normes analytiques en vigueur : séchage à l'étuve 40°C, lyophilisation,... (NF ISO 11464). Cette opération vise à désagréger l'échantillon séché et à en assurer l'homogénéisation.

A16.3 - ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES

Dans le cadre d'un simple diagnostic sédimentaire les paramètres à analyser en standard sont présentées dans le tableau ci-dessous. Les normes et méthodes analytiques indiquées ci-après sont données à titre indicatif :

<i>Paramètres</i>	<i>Référence de la méthode</i>	<i>Principe de la méthode</i>	<i>Limite de Quantification (mg/kg)</i>	<i>Coût unitaire €HT</i>
Analyses standards				
Granulométrie	NF X 31-107	Colonne à tamis ou laser	0 à 2 000 µm	100 - 150
Matière sèche	NF EN 11880	Gravimétrie		5 - 10
Densité	NF ISO 11464			5 - 10
Phosphore (P)	NF EN ISO 11 885	Minéralisation à l'eau régale et dosage ICP/AES	1	10 - 20
Azote Kjeldahl (NTK)	NF EN ISO 13342	Dosage par Spectrométrie	500	10 - 20
Carbone Organique Total (COT)	NF EN ISO 10694	Acidification et combustion haute température (~1250°C)		25 - 50
Analyses des Eléments Traces Métalliques (ETM)				
Arsenic (As)	NF EN ISO 11 885		1	5 - 10
Cadmium (Cd)	NF EN ISO 11 885		1	5 - 10
Chrome (Cr)	NF EN ISO 11 885		5	5 - 10
Cuivre (Cu)	NF EN ISO 11 885		5	5 - 10
Mercure (Hg)	NF EN ISO 1483		0,1	5 - 10
Nickel (Ni)	NF EN ISO 11 885	Minéralisation à l'eau régale et dosage ICP/AES	1	5 - 10
Plomb (Pb)	NF EN ISO 11 885		5	5 - 10
Zinc (Zn)	NF EN ISO 11 885		5	5 - 10
Aluminium (Al)	NF EN ISO 11 885		5	5 - 10
Fer (Fe)	NF EN ISO 11 885		5	5 - 10
Analyses de composés organiques				
HAP (16 US-EPA)	XP X 33-012	Extraction hexane/acétone et dosage GC/MS	0,1 µg/kg ps	150 - 200
PCBi (7 congénères)	XP X 33-012		0,01	150 - 200

Tableau 26 : Paramètres physico-chimiques descriptifs des sédiments

Ces paramètres ne renseignent que succinctement sur l'état du milieu sédimentaire mais répondent d'un point de vu réglementaire à l'Arrêté du 9 août 2006 relatifs aux niveau à prendre en compte lors d'une analyse de rejets dans les eaux de surface ou de sédiments marins, estuariens ou extraits de cours d'eau ou canaux.

Remarque : les Limites de Quantification (LQ) indiquées par le laboratoire doivent répondre aux conditions techniques de réalisation des analyses chimiques, physico-chimiques et écotoxicologiques formulées en Annexe 1 de l'Arrêté du 27 octobre 2011 portant agrément des laboratoires. Ces LQ sont définies par le laboratoire national de référence pour la surveillance de l'eau et des milieux aquatiques (AQUAREF), telles que la valeur de LQ proposée soit égale ou inférieure aux NQE (Normes de Qualité Environnementales issues de la DCE (Arrêté du 25 janvier 2010).

Sur le terrain : L'enregistrement des paramètres physico-chimiques du sédiment (température, pH, potentiel d'oxydoréduction) est recommandé pour venir étoffer ce diagnostic sédimentaire. Ces mesures seront réalisées *in-situ* à l'interface eau-sédiment, et non au laboratoire sur un échantillon dénaturé, pour caractériser au mieux les conditions du milieu. Elles seront réalisées grâce à l'utilisation d'un analyseur multimètre de terrain et consignée sur la fiche de prélèvement (cf. « Fiche Prélèvement »).



Figure 100 : Analyseur multimètre de terrain

Un exemple de rendu d'analyse granulométrique est proposé sur la figure suivante. Classiquement, les résultats sont représentés sous la forme d'une courbe cumulée des différentes fractions et/ou d'un histogramme de chaque fraction (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), à partir duquel les propriétés du sédiment sont identifiées.

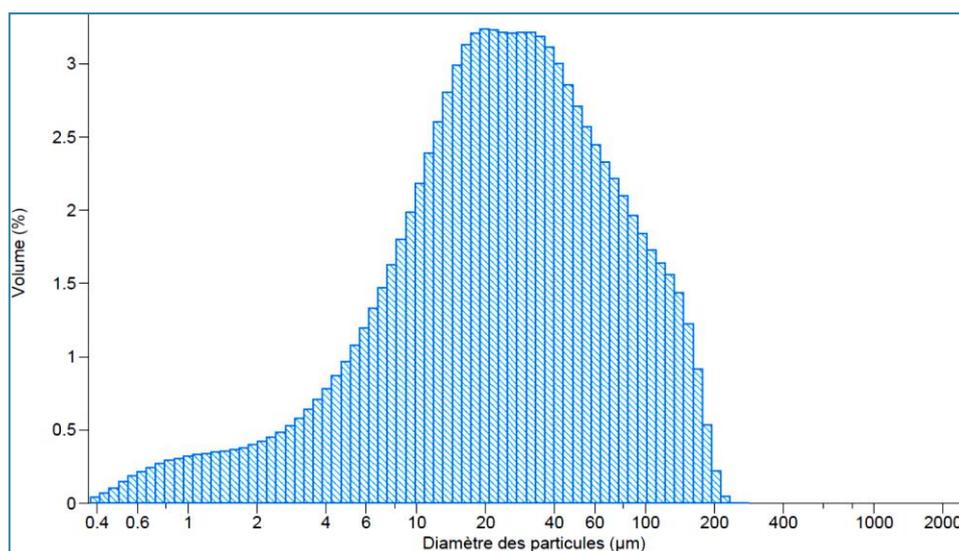


Figure 101 : Exemple d'historgramme granulométrique d'un sédiment à dominante limoneuse

Il existe de nombreuses classifications granulométriques qui permettent de qualifier un échantillon de sédiment. Classiquement, on admet les catégories de particules suivantes :

Fractions	Diamètre des particules
<i>Argiles :</i>	<i>< 2 μm</i>
<i>Limons :</i>	<i>< 63 μm</i>
<i>Sables fins :</i>	<i>63 - 250 μm</i>
<i>Sables moyens :</i>	<i>250 - 500 μm</i>
<i>Sables grossiers :</i>	<i>500 - 2000 μm</i>
<i>Cailloutis :</i>	<i>2 - 20 mm</i>
<i>Graviers :</i>	<i>20 - 200 mm</i>

Tableau 27 : Exemple de classification granulométrique des sédiments (d'après Glemarec)

Plusieurs paramètres granulométriques permettent de caractériser plus finement la distribution d'un sédiment. On relève ainsi :

- *La médiane : Diamètre de particules pour laquelle l'échantillon est séparé en deux effectifs égaux ;*
- *La moyenne : Diamètre moyen des particules de l'échantillon ;*
- *Le mode : Diamètre de particules représentatif de l'échantillon (fréquence cumulé la plus forte).*

Si plusieurs fractions granulométriques sont mises en exergues, on parle alors de mode principal, mode secondaire...

A16.4 - ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES COMPLÉMENTAIRES

Dans le cadre de travaux impliquant des sédiments contaminés, d'autres paramètres pourront faire l'objet de recherches plus spécifiques en fonction du contexte locale. On retiendra en particulier les composés organiques suivants :

- *Les organoétains (TBT, DBT, MBT) : Produit de synthèse, interdit en tant que biocide, mais utilisés anciennement dans les peintures antisalissures sur les navires ;*
- *Les hydrocarbures totaux (HCT) : Mélanges complexes de molécules de carbone et d'hydrogène regroupés par type (gazole, fioul et huile) et dits d'usage courant ;*
- *Les hydrocarbures aromatiques monocycliques (BTEX) : Substances introduites majoritairement par les activités humaines, à faible potentiel de bioaccumulation, mais très toxique pour l'environnement et la santé.*

D'un point de vu réglementaire et pour répondre aux exigences de l'Arrêté du 30 mai 2008 fixant les prescriptions générales applicables aux opérations d'entretien de cours d'eau et canaux, des analyses sur l'eau interstitielle des sédiments pourront être lancées. Ces analyses concernent les composés azotés :

- Azote total et ammoniacale (NH4) : Constituants naturels des sédiments mais polluants organiques toxiques pour le milieu aquatique et qui contribuent à la désoxygénation de l'eau.

L'analyse de ces composés sur l'eau interstitielle pourra s'accompagner d'une analyse de composés phosphorés (phosphore, orthophosphates) qui peuvent avoir des effets néfastes aussi pour le milieu aquatique (surproduction végétale).

L'analyse de ces paramètres sur la phase solide ou sur l'eau inertielle des sédiments peut s'avérer nécessaire lors d'opérations de curage ou de vidange de barrage qui remobilisent d'importantes quantités de particule dans la colonne d'eau.

Sur le terrain : L'enregistrement des paramètres physico-chimiques in situ dans la colonne d'eau (température, pH, conductivité, oxygène dissous, turbidité) complétera efficacement l'état initial du milieu avant travaux.

Paramètres	Référence de la méthode	Principe de la méthode	Limite de Détection (mg/kg)	Coût unitaire €HT
Analyses de composés organiques				
Organoétains (TBT, DBT, MBT)	NF EN ISO 23161	Dosage par CPG	0,01	150 - 250
HCT (C10-C40)	NF EN ISO 16703	Dosage par CPG	15	80 - 120
BTEX	NF EN ISO 11423-1	Extraction hexane/acétone et dosage GC/MS	0,05	100 - 150
Composés azotés et phosphorés				
Ammonium (NH4)	NF T 90-105-2		20	10 - 20
Nitrate (NO3) Nitrite (NO2)	NF EN ISO 10304-1	Dosage par Chromatographie ionique	20	10 - 20
Orthophosphates (PO4)	NF EN ISO 10304-1		20	10 - 20

Tableau 28 : Autres paramètres physico-chimiques descriptifs

Le tableau suivant synthétise les origines et les principaux effets des contaminants sur l'environnement aquatique (**Tableau 29**) :

NATURE DU POLLUANT	SOURCES		IMPACTS SUR LE MILIEU	
	Naturelles	Anthropiques	Directs	Indirects
Matières en Suspension (MES)	- Remobilisation de matière minérale et organique ;	- Rejets eaux usées ;	- Augmentation de la turbidité ; Modification des biocénoses ;	- Développement micro-organismes ; Diminution de la photosynthèse ;
Matière Organique	- Décomposition de matière végétale ou animale ;	- Rejets industriels et urbains ;	- Anoxie des fonds ; Modification de la structure des populations d'invertébrés benthiques ;	- Modification des biocénoses ;
Mercuré	- Volcanisme, érosion, dégazage océanique ;	- Combustion du charbon et du fuel, industrie minière et métallurgique, fabrication du chlore et de la soude ;	- Altération du phytoplancton ; Modification physiologique des poissons ; Empoisonnement des organismes vivants ; Ralentissement de la croissance des bivalves ;	- Modification des biocénoses ;
Cadmium	- Présent dans la croûte terrestre ;	- Sous-produit du raffinage du plomb et du cuivre, combustion du charbon et des produits pétroliers ;	- Inhibition de la croissance du phytoplancton ; Effets physiologiques sur les larves de crustacés ;	- Modification des biocénoses ;
Plomb	- Sol ;	- Production et utilisation dans les batteries, alliages, pigments, industries de fusion du plomb ;	- Ralentissement de la croissance des organismes vivants ; Inhibition de la reproduction des organismes vivants ;	- Modification des biocénoses ;
Zinc	- Eruptions volcaniques, feux de forêts, aérosols marins ;	- Activité minière et industrielle, épandage agricole, activités urbaines ;	- Action sur le développement larvaire des mollusques benthiques ;	- Modification des biocénoses ;
Cuivre	- Erosion, volcanisme, végétation ;	- Industrie du cuivre, des métaux, du bois et des fertilisants, incinération des déchets, énergies fossiles	- Action sur le développement larvaire des mollusques benthiques ;	- Modification des biocénoses ;
Chrome	- Croûte terrestre, érosion (chromite) ;	- Industrie chimique, métallurgie, technologie des réfractaires ;	- Anomalie dans le développement larvaire chez les bivalves ;	- Modification des biocénoses ;
Nickel	- Erosion, volcanisme ;	- Energie fossile, incinération des déchets, épandage des boues d'épuration, industrie du nickel, de l'acier et du plomb ;	- Effets sur la reproduction des bivalves ;	- Modification des biocénoses ;
Arsenic	- Activité volcanique, feu de forêt ;	- Alliages, fonderies de métaux non ferreux, traitement du bois, microélectronique, textile, pesticides, énergies fossiles ;	- Inhibition du développement du phytoplancton ;	- Modification des communautés planctoniques ;
PCB (Polychlorobiphenyles)	- Pas d'origine naturelle ;	- Anciens équipements électriques, condensateurs et transformateurs encore en usage ;	- Aucun impact direct	- Effets mutagènes et reprotoxiques sur les espèces aquatiques à long terme par bioaccumulation ;
TBT (Tributylétain)	- Pas d'origine naturelle ;	- Peintures antialissure, produits phytosanitaires ;	- Mortalité des mollusques ; Action sur la calcification, la croissance et la reproduction des mollusques ;	- Appauvrissement du milieu naturel ;
Hydrocarbures	- Feux de forêt, éruptions volcaniques.	- Combustion du pétrole, charbon, gaz naturel ou du bois, déversement accidentel ou volontaire de pétrole.	- Diminution de l'oxygénation des eaux ; Altération externe des organismes vivants ; Asphyxie des espèces aquatiques ; Diminution de la photosynthèse.	- Développement d'espèces opportunistes ; Effets mutagènes et tératogènes sur les espèces aquatiques.

Tableau 29 : Inventaire des sources et impacts potentiels des polluants

A16.5 - TESTS ÉCOTOXICOLOGIQUES

Les tests d'écotoxicologiques ou bio-essais ont pour objectif de renseigner sur les effets toxiques d'un échantillon sur différents compartiments de l'environnement. En parallèle des analyses physico-chimiques, les bio-essais ont l'avantage de prendre en compte les phénomènes de synergie et d'antagonisme entre les contaminants, souvent délicats à déceler dans le cadre de simple analyse.

Ce chapitre se concentre sur les bio-essais les plus souvent utilisés pour l'évaluation de l'écotoxicité des sédiments sur le milieu aquatique et terrestre. Chaque bio-essai est spécifique et son domaine de représentativité limité (toxicité, sensibilité de l'organisme testé, compartiment aquatique représenté,...). Il est donc recommandé de réaliser plusieurs tests, selon la complexité de l'étude, à différents niveaux trophiques (algue, crustacé, poisson) et degrés de toxicité (aiguë, chronique).

Toxicité aiguë : Toxicité immédiate, sur une courte période de la durée de vie des organismes, en général liée à une concentration élevée de produits chimiques ou d'un échantillon.

Toxicité chronique : Toxicité à long terme, incluant les phases juvéniles et de reproduction des organismes, en général liée à une exposition prolongée à de faibles concentrations de produits chimiques ou d'un échantillon.

Le tableau ci-dessous récapitule les principaux bio-essais standardisés et appliqués sur sédiment :

<i>Ecosystème</i>	<i>Organismes testés</i>	<i>Bio-essai</i>	<i>Toxicité</i>
<i>Milieu benthique</i>	<u>Bactéries</u> : - <i>Vibrio fischeri</i>	Microtox [®] – NF EN ISO 1348	Aiguë
<i>Milieu benthique</i>	<u>Macro-invertébrés</u> : - <i>Chironomus riparius</i>	Test Chironome (7/10j et 28j) XP T90-339-1	Chronique
<i>Milieu benthique</i>	<u>Crustacés</u> : - <i>Daphnia magna</i>	Test Daphnie (24h) – NF EN ISO 6341	Aiguë
<i>Milieu pélagique</i>	- <i>Cériodaphnia dubia</i>	Test Cériodaphnie (21j) – NF T 90-376	Chronique
<i>Milieu pélagique</i>	- <i>Brachionus calyciflorus</i>	Test Brachionus (48h) – NF T 90-377	Chronique
<i>Milieu pélagique</i>	<u>Algues</u> : - <i>Pseudokirchneriella subcapitata</i> (anc. <i>Selenastrum Capricornutum</i>)	Test algue (72h) – NF T 90-375	Chronique
<i>Milieu terrestre</i>	<u>Végétaux</u> : - Avoine, colza, laitue,... - Avoine, colza, laitue,...	Test de germination (4/7j) – NF X 31-201 Test de croissance (17j) – NF X 31-202	Moyen terme
	<u>Macro-invertébré</u> : - <i>Eisenia foetida</i>	Test ver de terre (14j) – NF X 31-251	Aiguë

Tableau 30 : Tests écotoxicologiques appliqués sur sédiment

Remarque : Certains bio-essais sont réalisés indirectement sur sédiment soit à travers les eaux interstitielles, soit sur les éluats des matériaux, au moyen d'un essai de lixiviation ou de percolation. Le choix de la phase aqueuse à tester dépendra alors principalement de l'analyse des mécanismes et voies de transferts des contaminants en rapport avec le projet.

A16.6 - TEST DE DANGÉROSITÉ

A16.6.1 - Critère H14 - sédiment

Ce protocole a été établi par le groupe de travail « *dangérosité des sédiments* » piloté par le MEEDDM et co-animé par le BRGM pour la mesure du critère « H14 » sur les sédiments marins et continentaux (1^{er} octobre 2009). Plusieurs opérateurs sont impliqués dans son élaboration (Géode, VNF, EDT, Port de Paris...), ainsi que différents organismes scientifiques (BRGM, CEMAGREF, CETMEF, IFREMER, INERIS...).

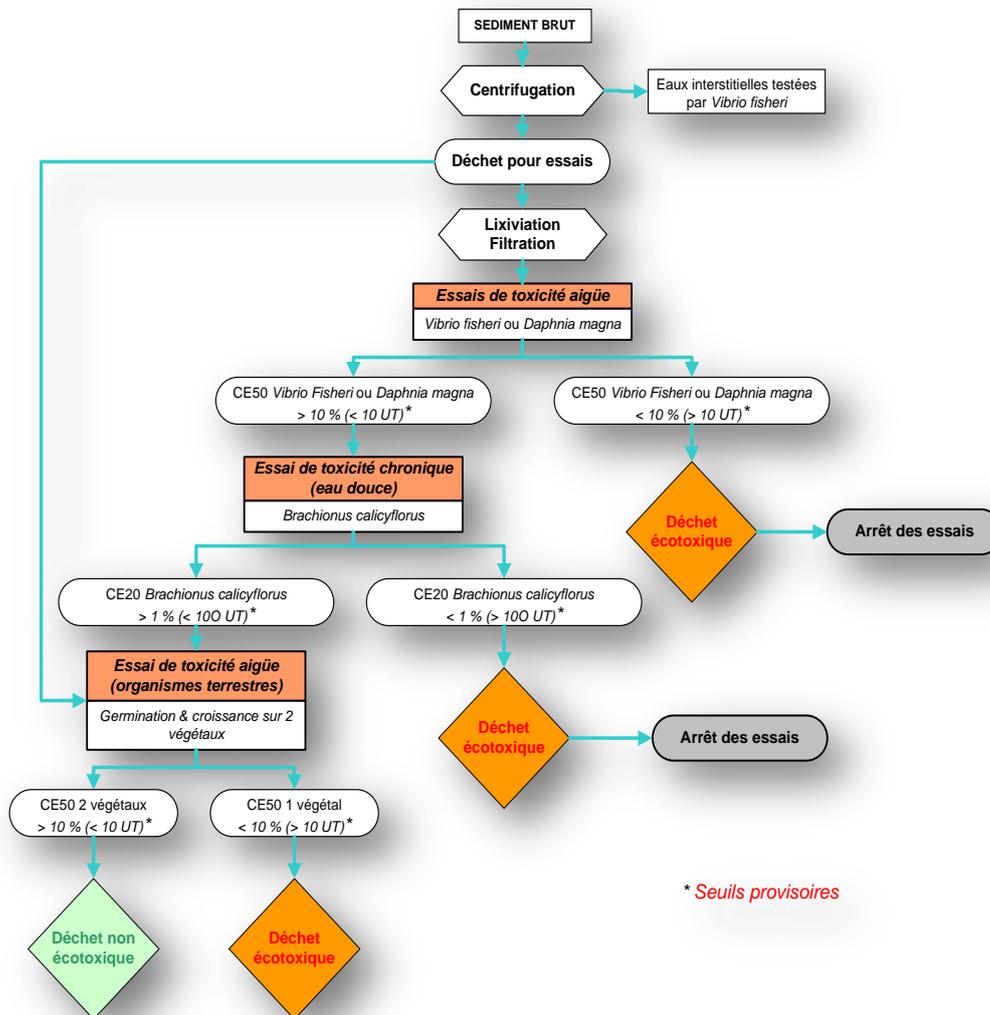
Ce protocole fait intervenir une batterie de différents tests écotoxicologiques dont la mise en application a pour objet la définition du caractère dangereux ou non du sédiment en vue de sa gestion à terre.

La volonté du MEEDDM est que le protocole « *H14 - sédiments* » s'insère dans le contexte général "déchets" qui prévaut aujourd'hui, sans accorder aux sédiments une originalité que presque tous les producteurs de déchets pourraient revendiquer pour leurs propres déchets.

A partir de ce postulat, la proposition est de suivre les principes de base du protocole "déchet" issu des travaux de l'INERIS, à savoir :

- *Prise en compte de la toxicité de l'éluat (toxicité aiguë sur bactérie *Vibrio fisheri* ou *Daphnia magna* et toxicité chronique sur *Brachionus calyciflorus*) ;*
- *Prise en compte de la toxicité de la matrice brute (toxicité aiguë sur végétaux).*

Le protocole « H14 - sédiment » prévoit ainsi la réalisation de trois types de tests d'écotoxicités en fonction du degré de contamination des sédiments étudiés (Figure 102).



* Seuils provisoires

Figure 102 : Démarche du protocole H14 « sédiment » [MEEDDM]

A16.6.2 - Vers un test H15

La directive 2008/98/CE reprend les dispositions de la directive 91/689/CE relative aux déchets dangereux, incluant les quatorze critères (H1 à H14) permettant de qualifier ou non la dangerosité de certains déchets, auxquels sont aujourd’hui rattachés les sédiments gérés à terre.

Cette directive introduit aussi un quinzième critère : « H15 : Déchets susceptibles, après élimination, de donner naissance, par quelque moyen que ce soit, à une autre substance, par exemple un produit de lixiviation, qui possède l’une des caractéristiques énumérées ci-dessus ». Le protocole associé à ce critère n’est pas en l’état connu.

A16.7 - AUTRES TESTS PRATIQUÉS

A16.7.1 - Test de lixiviation

L’objectif des tests de lixiviation est de caractériser le comportement du sédiment vis-à-vis de la mobilité des éventuels contaminants qu’il contient (potentiel de relargabilité). Les tests de lixiviation correspondent à un des principaux critères d’admission d’un déchet en Installation de Stockage de Déchets (ISD).

Les analyses sont réalisées selon le protocole normalisé NF EN 12457-2, dont les étapes sont rappelées dans le tableau ci-dessous :

Etape	Manipulation
1	Tamassage à 4 mm (si le refus représente plus de 5% de la masse de l'échantillon, il est broyé à 4 mm dans un concasseur pour obtenir un échantillon avec au moins 95% de la masse inférieure à 4 mm) ;
2	Homogénéisation de l'échantillon, le lixiviant (eau déminéralisée) est ajouté à l'échantillon dans un un ratio Liquide / Solide = 10 (10 l/kg) ;
3	L'échantillon est ensuite agité par retournement pendant 24 heures à 7 tours par minute ;
4	Décantation et centrifugation de l'échantillon ;
5	Filtration de l'éluat sur un filtre de porosité 0,45 µm ;
6	Lancement des analyses physico-chimiques sur éluat.

Tableau 31 : Principales étapes du test de lixiviation

Le test de lixiviation porte sur les paramètres suivants, sur éluat :

Paramètres sur éluat	Limites de Quantification couramment rencontrées (mg/kg MS)
Arsenic (As)	0,2
Baryum (Ba)	0,1
Cadmium (Cd)	0,002
Chrome (Cr)	0,1
Cuivre (Cu)	0,2
Mercure (Hg)	0,001
Molybdène (Mo)	0,1
Nickel (Ni)	0,1
Plomb (Pb)	0,1
Antimoine (Sb)	0,02
Sélénium (Se)	0,02
Zinc (Zn)	0,2
Chlorures	10
Sulfates	50
Fluorures	5
Indice phénol	0,1
Fraction soluble	2000
Carbone Organique Total (COT)	5

Tableau 32 : Paramètres analysés sur éluat conforme Arrêté du 28/10/2010²¹

Les analyses suivantes sont aussi réalisées sur matière brute :

Paramètres sur brut	Limites de Quantification couramment rencontrées (mg/kg MS)
Polychlorobiphényles (PCBi)	0,07
Hydrocarbures totaux (HCT)	15
Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)	0,8
Hydrocarbures Aromatiques Monocycliques (BTEX)	0,25
Matière sèche	0,1
Carbone Organique Total (COT)	1000

Tableau 33 : Paramètres analysés sur brut conforme Arrêté du 28/10/2010

²¹ Arrêtes du 28/10/10 : Seuils d'acceptabilités en Installation de Stockage de Déchets Inertes (ISDI)

A16.8 - FICHES « TESTS ECOTOXICOLOGIQUES »

A16.8.1 - Test Microtox®

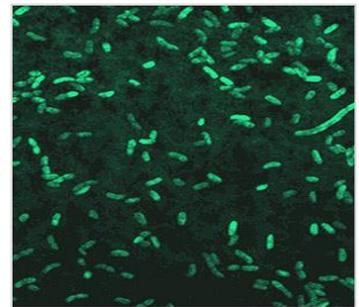
Référence normative : NF EN ISO 1348-2

Objectif / domaine d'application :

Le test permet d'évaluer la toxicité aiguë des eaux interstitielles ou de l'éluat d'un sédiment vis-à-vis des bactéries *Vibrio fischeri* (anc. *Photobacterium phosphoreum*).

Principe général :

Il consiste à déterminer la concentration de l'échantillon qui, après 5, 15 et 30 minutes, inhibe 50 % de la luminescence des bactéries (test aussi appelé de « bioluminescence »). Cette Concentration d'Inhibition est désignée alors par la CI_{50} - t, t représentant le temps de contact des bactéries avec l'échantillon.



Informations pratiques :

Le volume nécessaire pour porter le test est de 125 ml.

Les montants moyens affichés par les laboratoires avoisinent 150 à 300 €HT/analyse.

Les délais d'analyses affichés sont généralement d'une semaine, incluant la lixiviation.

A16.8.2 - Test Chironome

Référence normative : XP T90-339-1

Objectif / domaine d'application :

Le test consiste à évaluer la survie, la croissance et l'émergence des *Chironomus riparius* (vers inféodés au sédiment) exposés directement à un sédiment.

Principe général :

Les chironomes au stade larvaire sont exposés directement au sédiment pendant 7 ou 10 jours (test de survie et de croissance). A l'issue de cette première phase, l'émergence des chironomes est observée pendant 28 jours. Les émergents peuvent être récupérés pour prolonger le test et étudier le cycle de vie de la seconde génération de chironomes.

Les données enregistrées au cours du test de toxicité chronique sont analysées pour estimer une concentration de sédiment qui entraînerait une réduction de l'effet mesuré (en %) et une Concentration Sans Effet Observé (CSEO).



Informations pratiques :

Le volume nécessaire pour porter le test est de 1 à 2 L.

Les montants moyens affichés par les laboratoires avoisinent 1000 €HT/analyse

Les délais d'analyses affichés sont généralement de 15 jours à 1 mois ½.

A16.8.3 - Test Daphnie

Référence normative : NF EN ISO 6341

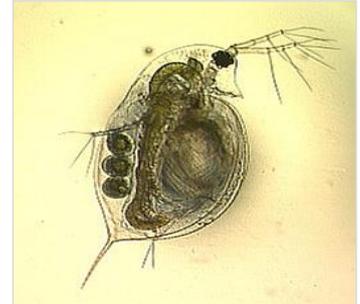
Objectif / domaine d'application :

Le test permet d'évaluer la toxicité aiguë des eaux interstitielles ou de l'éluat d'un sédiment vis-à-vis des microcrustacés *Daphnia magna*

Principe général :

Il consiste à déterminer la concentration de l'échantillon qui immobilise en 24 heures (ou 48h) 50 % des daphnies. Cette concentration, dite Concentration Efficace est désignée par la CE₅₀.

L'essai est conduit en deux étapes *i)* un essai préliminaire indiquant approximativement la CE₅₀ 24h *ii)* un essai définitif permettant d'affiner l'intervalle des concentrations qui lors de l'essai préliminaire font passer le pourcentage d'immobilisation de 0 à 100 %.



Informations pratiques :

Il existe un test d'écotoxicologie chronique sur *Daphnia magna* (21 jours) ou *Ceriodaphnia dubia* (7 ou 8 jours) basé sur l'inhibition de la reproduction des microcrustacés au stade adulte.

Le volume nécessaire pour porter le test est de 500 ml.

Les montants moyens affichés par les laboratoires avoisinent 180 à 350 €HT/analyse.

Les délais d'analyses affichés sont généralement de une semaine sur test aigu à 1 mois pour les tests de toxicité chroniques.

A16.8.4 - Test Brachionus

Référence normative : AFNOR NFT 90-377 ou NF ISO 20666

Objectif / domaine d'application :

Le test permet d'évaluer la toxicité chronique des eaux interstitielles ou de l'éluat d'un sédiment vis-à-vis du microcrustacé (rotifère) *Brachionus calyciflorus*

Principe général :

Son principe repose sur un essai d'inhibition de la croissance des populations de *Brachionus* sur 48 heures. A l'issue du test, un pourcentage d'inhibition est déterminé pour chaque concentration. Les résultats sont exprimés en CI₂₀, c'est-à-dire la Concentration qui Inhibe 20% des individus (blocage de la reproduction).



Informations pratiques :

Actuellement ce biotest est utilisé par les Voies Navigables de France (VNF) pour l'évaluation de la toxicité potentielle des sédiments de dragages, selon un protocole normalisé NFT90-377. Sur la base des recommandations VNF [2008], les sédiments sont classés de la façon suivante :

- Si la CI_{20} (48 h) < 1% (il faut moins de 1% du lixiviat du produit pour avoir une inhibition de 20% de la population) alors le sédiment est écotoxique et donc dangereux ;
- Si la CI_{20} (48 h) > 1% (il faut plus de 1% du lixiviat du produit pour avoir un impact) alors le sédiment est non écotoxique et donc non dangereux.

Le volume nécessaire pour porter le test est de 500 ml.

Les montants moyens affichés par les laboratoires sont de 250 à 300 €HT/analyse.

Les délais d'analyses affichés sont généralement de 2 à 4 semaines maximum.

A16.8.5 - Test Algue d'eau douce

Référence normative : NF T 90-375 ou NF EN ISO 8692

Objectif / domaine d'application :

Le test permet d'évaluer la toxicité chronique des eaux interstitielles ou de l'éluat d'un sédiment sur les algues d'eau douce *Pseudokirchneriella subcapitata* (anc. *Selenastrum Capricornutum*).



Principe général :

Il consiste à déterminer la concentration de l'échantillon testé qui inhibe en 72 heures 50 % de la croissance des algues. Cette concentration, dite Concentration Efficace est désignée par la CE_{50} .

Informations pratiques :

Le volume nécessaire pour porter le test est de 250 ml.

Les montants moyens affichés par les laboratoires sont d'environ 500 à 700 €HT/analyse.

Les délais d'analyses affichés sont généralement d'une semaine.

Tests sur le milieu terrestre

A16.8.6 - Test de germination (NF x 31-201) et croissance (NF x 31-202) des végétaux

Référence normative :

Test de germination : NF x 31-201 ;

Test de croissance des végétaux : NF x 31-202 ou NF iso 11269-2

Objectif / domaine d'application :

Le test permet d'évaluer la toxicité à moyen terme des sédiments vis-à-vis de différents végétaux (avoine, colza, laitue,...), notamment celles d'intérêt agricole.



Principe général :

Les échantillons de sédiment sont dilués avec un milieu ISO (mélange de 70% de sable de Fontainebleau, 20 % de kaolinite et 10 % de sphaigne). Les différentes graines sont plantées dans les dilutions et l'essai se déroule en 2 étapes :

1. Un essai préliminaire de 7 jours qui permet d'étudier l'effet de différentes concentrations comprises entre 1 et 100 % d'échantillon ;
2. Un essai définitif pour lequel une série de 5 dilutions est réalisée (en se plaçant aux bornes des dilutions pour lesquelles l'émergence passait de 0 à 100 % lors de l'essai préliminaire).

Après 7 jours, les graines germées sont comptabilisées pour déterminer l'effet sur la germination et le nombre de pousses est réduit à cinq. Après 14 jours minimum et au maximum au bout 21 jours, la biomasse de chaque dilution est quantifiée par pesée.

Informations pratiques :

Le volume nécessaire pour porter le test est de 2 à 3 L.

Les montants moyens affichés par les laboratoires sont de €HT/analyse.

Les délais d'analyses affichés sont généralement d'une semaine pour le test de germination et de 3 semaines pour le test de croissance végétale.

A16.8.7 - Test vers de terre (NF x 31-251)

Le test permet d'évaluer la toxicité aiguë des sédiments vis-à-vis des vers de terre *Eisenia fetida*. Les sédiments sont préalablement dilués dans un substrat artificiel avant d'être mis en contact avec les vers. La mortalité des vers est suivie quotidiennement. Après 14 jours, les macro-invertébrés sont comptabilisés dans les différentes dilutions pour déterminer l'effet sur la mortalité des vers de terre.



A16.8.8 - Remarques sur les « Microbiotests »

Depuis quelques années, plusieurs des tests précités (Daphnie, Brachionus, Micro-algue), font l'objet d'amélioration pour faciliter leur mise en œuvre qui nécessitait jusqu'alors des mises en culture parfois longues et délicates et des coûts associés onéreux.

Ces « kits » d'analyse permettent d'éviter un maintien des stocks vivant d'organismes en privilégiant, par exemple, les œufs de dormance, conservables et dont l'éclosion est contrôlable « à la demande » (Source : *Laboratoire d'Ecotoxicologie et d'Ecologie Aquatique, Univ. de Gand, Belgique*).

Depuis quelques années, plusieurs des tests précités (Daphnie, Brachionus, Micro-algue), font l'objet d'amélioration pour faciliter leur mise en œuvre qui nécessitait jusqu'alors des mises en culture parfois longues et délicates et des coûts associés onéreux.

Ces « kits » d'analyse permettent d'éviter un maintien des stocks vivant d'organismes en privilégiant, par exemple, les œufs de dormance, conservables et dont l'éclosion est contrôlable « à la demande » (Source : *Laboratoire d'Ecotoxicologie et d'Ecologie Aquatique, Univ. de Gand, Belgique*).

A17 - GESTION À TERRE DES SÉDIMENTS EXTRAITS

Cette annexe sera rédigée après la sortie prévue fin 2013 des documents suivants, avec lesquels elle fera le lien :

- *De l'étude du CETE de Lyon sur*
- *Des documents AXELERA*

A18 - RÉFÉRENTIELS DE QUALITÉ DES SÉDIMENTS

La définition du caractère polluant, toxique ou dangereux des sédiments s'opère à partir de plusieurs référentiels en vigueur qu'ils soient réglementaires ou simplement définis au travers des préconisations scientifiques reconnues.

Le points suivants détaillent ces principaux niveaux de référence, leur portée, et leur application à différents contextes : sédiments dans le milieu aquatique ou en gestion à terre.

A18.1 - SEUILS LOI EAU : QUALITÉ DES SÉDIMENTS EXTRAITS DE COURS D'EAU OU CANAUX - ARRÊTÉ DU 9 AOÛT 2006

La réglementation en vigueur fait état de valeurs seuils données par l'Arrêté du 9 août 2006 « relatif aux niveaux à prendre en compte lors d'une analyse de rejets dans les eaux de surface ou de sédiments marins, estuariens ou extraits de cours d'eau ou canaux ».

Ces valeurs réglementaires sont regroupées sous la dénomination de seuils « S1 » pour les sédiments des cours d'eau ou canaux (Tableau 34). Pratiquement, ces seuils **n'ont vocation à servir de valeur d'évaluation d'impact** sur les milieux aquatiques, mais sont utilisés pour statuer de la procédure réglementaire à engager dans le cadre d'opérations en lien avec le milieu aquatique, en application de la Nomenclature Loi sur l'Eau [Annexe au Décret n°2006-881 du 17 juillet 2006].

Au-delà de S1, le régime d'instruction au titre du Code de l'Environnement est susceptible de changer selon les volumes concernés (Déclaration ou Autorisation), tel que :

- Volume > 2000 m3 → Autorisation
- Volume < 2000 m3 et teneur des sédiments > S1 → Autorisation
- Volume < 2000 m3 et teneur des sédiments < S1 → Déclaration

Niveaux réglementaires	Loi sur l'Eau Arrêté du 9 août 2009
ETM	Seuil S1 (mg/kg)
Arsenic (As)	30
Cadmium (Cd)	2
Chrome (Cr)	150
Cuivre (Cu)	100
Mercure (Hg)	1
Nickel (Ni)	50
Plomb (Pb)	100
Zinc (Zn)	300
PCB	
Somme des PCB	0,68
HAP	
Somme des 16 HAP	22,8

Tableau 34 : Seuils réglementaires S1 de l'Arrêté du 9 août 2006

Les valeurs S1 constituent souvent un premier point de repère permettant d'apprécier l'incidence d'une opération et correspondent à des niveaux potentiels d'impact croissant sur un même milieu *[rem. IDRA : le seuil S1 n'est pas décisif quand au devenir du projet c'est l'étude d'incidence qui l'est]. Ces seuils sont supérieurs aux seuils d'acceptabilité en décharge de déchets inertes. [Attention ! les valeurs seuils de l'Arrêté d'octobre 2010 sur les déchets inertes portent, pour les métaux, sur les éluats et non sur brut. Seuls les valeurs de HAP et PCB sont comparables aux seuils S1 ; les seuils inertes sont (encore) moins drastiques que les seuils S1].*

Remarque : Les valeurs seuils S1 sont les mêmes que les seuils « sol » de valorisation agricole des boues de STEP [Arrêté du 8 janvier 1998, cf. § 4.7.2.3], au paramètre Arsenic près, ceci en dépit de la différence

flagrante de milieu (terrestre/aquatique). Ces valeurs sont issues pour partie d'essais écotoxicologiques. *Se repose ici la question de la relation entre les seuils de références à utiliser et ce que l'on veut faire des sédiments (maintien dans le milieu ou exportation à terre). Le fait que ce soit des références d'utilisation de boues à terre me laisse supposer que les rédacteurs pensaient aussi à une utilisation à terre des sédiments.*

[IDRA : En attente de réponse scientifique]...

A18.2 - SEUILS S1/S2 PCB (CEMAGREF)

Dans le cadre d'une collaboration entre le SNRS²², la DIREN de bassin et l'IRSTEA (ex CEMAGREF), une proposition de seuils décisionnels pour la gestion des sédiments à draguer dans le Rhône a été mise point pour les PCB²³.

Cette proposition repose en partie sur le principe retenu de non dégradation du milieu aquatique par rapport aux objectifs décrits dans la Directive Cadre sur l'Eau 2000/60 (Article 4). Ces valeurs seuils visent avant tout à protéger la ressource piscicole et elles prennent en compte les processus d'empoisonnement secondaires le long de la chaîne trophique. Cette recommandation concerne les travaux fluviaux qui impliquent la manipulation des sédiments et provoquent leur remise en suspension, même partielle.

Ainsi, l'impact des PCB sur le milieu aquatique est examiné selon les seuils « S1/S2 » suivants :

Concentration en PCB indicateurs dans les sédiments (analyse sur fraction fine du sédiment < 2mm)			
	S1 [PCBi] < 10 µg/kg	10 µg/kg < [PCBi] < 60 µg/kg	S2 [PCBi] > 60 µg/kg MS
RESTITUTION AU MILIEU AQUATIQUE	OUI Pas de précaution supplémentaire spécifique aux PCB	OUI, mais précaution nécessaire : Le procédé utilisé doit restituer un fond de qualité équivalente à celui échantillonné avant l'intervention (comparaison entre la concentration de la couche de surface du lieu de dépôt/sédimentation à la concentration moyenne du matériau déplacé).	NON Pas de restitution du sédiment au milieu dans ces conditions

Tableau 35 : Proposition de seuils S1/S2 PCB du CEMAGREF

Remarque : Le seuil « S1 CEMAGREF » de 10 µg/kg MS a été défini sur la base des arrêtés « substances » promulgués dans le cadre de la mise en œuvre de la DCE et d'un coefficient de partage entre l'eau et le sédiment. Ce seuil peut faire l'objet d'un ajustement en fonction du taux de matière organique du sédiment. Le seuil S2 de 60 µg/kg a été choisi en application du principe de précaution sur les bases de données bibliographiques récentes.

²² Service Navigation Rhône Saône

²³ SNRS, SERE. 2008 – Recommandation pour la manipulation des sédiments du Rhône dans le contexte de pollution par les PCB – 4p

L'application de ces seuils, proposés pour le système fluvial, apparaît néanmoins applicable au contexte lacustre dans la mesure où la méthode de définition par l'équilibre de partition²⁴ (pour S1) est d'autant plus vérifiable car le maintien de l'équilibre paraît plus certain en milieu lacustre.

[IDRA : point en cours sur les derniers ajustements des seuils S1/S2 qui passeraient à S1=10 µg/KG MS et S2 = 30 µg/Kg MS (cf. entretien M. BABUT)]

A18.3 - QUOTIENT DE RISQUE QSM

Le Q_{SM} est un indice de contamination englobant l'ensemble des paramètres analysés. Il a été mis en place par VNF en 2004, sur la base de travaux du CEMAGEF et de l'ENTEPE, pour permettre d'apprécier le risque engendré par la manipulation d'un sédiment sur le milieu aquatique. Il est défini comme suit :

$$Q_{SM} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{S_i}$$

Avec :

C_i : concentration du polluant i dans le sédiment

S_i : valeur seuil S1 du polluant i (Arrêté du 9 août 2006)

n : nombre de polluants analysés

Les valeurs seuils prises en compte dans le calcul sont les suivantes :

	Substance	S_i (mg/kg MS) (arrêté du 09/08/2006)
ETM	Arsenic (As)	30
	Cadmium (Cd)	2
	Chrome (Cr)	150
	Cuivre (Cu)	100
	Mercure (Hg)	1
	Nickel (Ni)	50
	Plomb (Pb)	100
	Zinc (Zn)	300
PCB	Somme des congénères 8, 52, 101, 118, 138, 153 et 180	0,680
HAP	HAP totaux (16 US EPA)	22,8

Tableau 36 : Seuils S_i appliqués au calcul du QSM

La discrimination par le Q_{SM} se fait de la façon suivante :

- $Q_{SM} < 0,1$: Sédiments non pollués – Risque négligeable : les matériaux peuvent être gérés sans contraintes particulières ;
- $0,1 < Q_{SM} < 0,5$: Risque faible – Dangerosité à vérifier par la réalisation d'un test écotoxicologique : le test Cl_{20} *Brachionus* (48h) ;

²⁴ Modèle de l'équilibre de partage : approche analytique basée sur l'équilibre thermodynamique permettant de quantifier la distribution d'un contaminant entre les différents compartiments environnementaux (eau-sédiment-biote).

- *QSM > 0,5 : Risque non négligeable – Réaliser un diagnostic approfondi, et notamment a minima un test Cl_{20} *Brachionus* (48h) et un test de lixiviation.*

A18.4 - VALEURS ÉCOTOXICOLOGIQUES PNEC ET RÉGLEMENTAIRES NQE

L'évaluation de la toxicité d'un contaminant passe par l'estimation de sa concentration dite sans effets pour l'environnement : PNEC (*Predicted Non Effect Concentration*). Il existe des PNEC eau douce, eau marine, sédiment et orale (empoisonnement secondaire des prédateurs par leurs proies). Toutes ces valeurs seuils sont extrapolées à partir de résultats écotoxicologiques, affectés d'un facteur d'incertitude variable selon la qualité et la quantité des données nécessaire au calcul. Les PNEC sont calculées et validées par des organismes experts, comme l'INERIS²⁵ en France.

Concernant le compartiment sédimentaire, les PNEC sédiment sont peu nombreuses et souvent dérivées à partir des PNEC eau (méthode des lois de partage). Les PNEC ainsi déterminées doivent donc être prises avec précaution et utilisées comme des indicateurs [LACHAMBRE & FISSON, 2007].

PARAMÈTRES	PNEC_{SEDIMENT} (mg/kg sec)
<i>Cadmium</i>	<i>2,3 + bruit de fond</i>
<i>Cuivre</i>	<i>0,8</i>
<i>Mercure</i>	<i>9,3 + bruit de fond</i>
<i>Plomb</i>	<i>53,4 + bruit de fond</i>
<i>Zinc</i>	<i>37 + bruit de fond</i>

Tableau 37 : Exemple de PNEC sédiment [INERIS, 2012]

La Directive Cadre sur l'Eau (DCE) 2000/60/CE établit le cadre de la politique commune à mettre en œuvre afin de rétablir ou d'assurer le maintien du bon état écologique et chimique des eaux en Europe. Cela se traduit par l'amplification des actions de surveillance des écosystèmes aquatiques et l'adoption par l'ensemble des Etats-membres d'une méthodologie visant à définir des seuils de qualité pour l'environnement. Ces seuils sont appelés Normes de Qualité Environnementales (NQE). L'annexe VIII de la DCE liste 83 substances jugées prioritaires.

Une NQE représente la concentration d'un polluant ou d'un groupe de polluants dans l'eau, les sédiments ou le biote, qui ne doit pas être dépassée afin de protéger la santé humaine et les écosystèmes.

Les NQE sont déterminées à partir des travaux de recherche réalisés sur les PNEC. Elles sont consultables pour les eaux de surface et les biotes dans l'Arrêté du 25 janvier 2010 relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface (Annexe 8 de l'Arrêté).

La Directive Cadre sur l'Eau décrit la procédure d'établissement des NQE pour les substances organiques dans la colonne d'eau mais reste floue concernant l'étude des sédiments ou l'empoisonnement secondaire.

²⁵ INERIS : Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques

Les états membres ont donc toute latitude pour ce qui concerne les PNEC sédiments et empoisonnement secondaire. **Aucune NQE sédiment n'est actuellement disponible**, excepté dans la Circulaire du 28 juillet 2005 définissant des NQE provisoires dont certaines sont calculées à partir des lois de partage pour le sédiment.

PARAMÈTRES	NQEp_{SEDIMENT} (mg/kg sec)
<i>Fluoranthène</i>	0,083
<i>Benzo(a)pyrène</i>	7,6
Benzo(b)fluoranthène	0,17
Benzo(k)fluoranthène	0,014
<i>TBT</i>	0,01

Tableau 38 : Exemple de NQE provisoire sédiment [Circulaire 28/07/2005]

Compte tenu des écarts très importants pour une même substance entre les NQE des différents pays, tant à l'échelle communautaire que mondiale, la situation en 2012 est intermédiaire quant à la prise en compte de la qualité des sédiments dans l'évaluation de l'état des milieux aquatiques, alors que :

- des contaminations de biote (poissons par exemple) sont constatées, dont certaines mises en relation directe avec la contamination des sédiments ;
- la réflexion PNEC sédiments démarre juste et n'a pas encore permis de confirmer ou de faire évoluer les seuils de la réglementation.

Remarque 1 : Ces NQEp sédiment doivent être utilisées avec précaution (exemple : le Benzo(a)pyrène dont les effets toxiques sont supérieurs aux benzofluoranthènes, possède une NQEp moins restrictive).

Remarque 2 : Le Groupe Géode a récemment proposé des valeurs seuils destinées à compléter les référentiels « immersion » en milieu marin (seuils N1/N2 de l'Arrêté du 9 Août 2006), spécifiquement pour les 16 HAP_{US EPA} [GÉODE²⁶, 2011]. Ces valeurs sont directement issues d'une approche écotoxicologique (comparaison entre l'occurrence d'une substance donnée et un effet biologique sur les organismes) et non d'un traitement purement statistique d'un jeu de données. Bien que présentées pour le milieu marin, réputé d'une plus grande biodiversité que les milieux aquatiques continentaux (spectre de sensibilité plus large des espèces), elles constituent à tous ces égards des référentiels fondés, mais n'ont, en l'état, pas fait l'objet d'une validation réglementaire.

PARAMÈTRES	Valeurs seuils N1 (mg/Kg MS)	Valeurs seuils N2 (mg/Kg MS)
<i>Naphtalène</i>	0,16	1,13
<i>Acénaphtylène</i>	0,04	0,34
<i>Acénaphène</i>	0,015	0,26
<i>Fluorène</i>	0,02	0,28
<i>Phénanthrène</i>	0,24	0,87
<i>Anthracène</i>	0,085	0,59
<i>Fluoranthène</i>	0,6	2,85
<i>Pyrène</i>	0,5	1,5
<i>Benzo(a)anthracène</i>	0,26	0,93

²⁶ GEODE : Groupe d'Etudes et d'Observations sur les Dragages et l'Environnement

<i>Chrysène</i>	0,38	1,59
<i>Benzo(b)fluoranthène</i>	0,4	0,9
<i>Benzo(k)fluoranthène</i>	0,2	0,4
<i>Benzo(a)pyrène</i>	0,43	1,015
<i>Dibenzo(ah)anthracène</i>	0,06	0,16
<i>Benzo(ghi)pérylène</i>	1,7	5,65
<i>Indeno(1,2,3-c,d)pyrène</i>	1,7	5,65
<i>Somme des HAP</i>	-	-

Tableau 39 : Propositions de valeurs seuils HAP en milieu marin [Géode, 2011]

A18.5 - BRUIT DE FOND GÉOCHIMIQUE

L'activité volcanique, les feux de forêt ou encore l'érosion des roches émettent naturellement dans l'environnement certains contaminants. Les concentrations naturelles en contaminant (métaux et HAP principalement) retrouvées dans l'eau, les sols, les sédiments et les biotes sont alors appelées bruit de fond.

Remarque : Il arrive que certaines valeurs écotoxicologiques (PNEC) induisent des effets toxiques à des concentrations inférieures au bruit de fond dans une zone d'étude. Dans ce cas, la démarche consiste à prendre en compte le bruit de fond local pour évaluer concrètement les risques sur l'environnement (relativisation des impacts).

Il existe plusieurs bases de données sur les bruits de fond géochimique à des échelles géographiques variables (régionale, nationale, européenne). Elles concernent principalement les teneurs en métaux retrouvés dans les sols, à l'instar du programme national ASPITET (*Apports d'une Stratification Pédologique pour l'Interprétation des Teneurs en Eléments Traces*) diligenté par l'INRA. Ce programme résulte d'une analyse statistique nationale sur le Fond Pédogéochimique Naturel (FPGN) dont les résultats sont regroupés dans la base de données du GIS SOL.

ETM (mg/Kg MS)	Gammes de valeur couramment observés dans les sols ordinaires	Valeurs repères	Seuil d'investigation
Arsenic	1,0 à 25,0	25	
Cadmium	0,05 à 0,45	0,5	0,7
Chrome	10 à 90	40	100
Cuivre	2 à 20	40	35
Mercure	0,02 à 0,10	-	-
Nickel	2 à 60	31	70
Plomb	9 à 50	30	60
Zinc	10 à 100	110	150

Tableau 40 : Valeurs du programme ASPITET [INRA, GIS SOL]

Remarque : Des bruits de fond spécifiques au compartiment sédimentaire sont disponibles dans les bases de données suivantes :

- INERIS, 2012. – *Fiches de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques* ;
- FOREGS – *Forum of European Geological Survey Directors*.

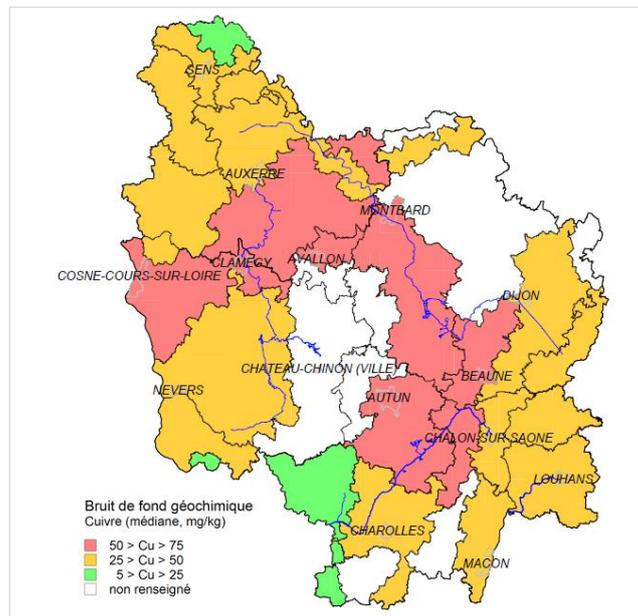


Figure 103 : Exemple d'une carte du fond géochimique en Cuivre dans les sols, par régions agricoles en Bourgogne [INRA/IDRA]

A18.6 - RÉFÉRENTIELS DE GESTION À TERRE DES SÉDIMENTS

Il n'existe actuellement pas de réglementation spécifique aux sédiments et boues de dragage, on doit donc aborder la problématique sous l'angle des dispositions législatives et réglementaires relatives aux déchets, auxquels sont rattachés les sédiments qui ne sont pas uniquement déplacés au sein des eaux de surface. Cette logique ne proscrie donc en rien les possibilités d'une valorisations ultérieures.

L'Article L541-2-2 du Code de l'Environnement précise que les sédiments « déplacés au sein des eaux de surface aux fins de gestion des eaux et des voies d'eau, de prévention des inondations, d'atténuation de leurs effets ou de ceux des sécheresses ou de mise en valeur des terres ne sont pas soumis à la réglementation sur les déchets s'il est prouvé que ces sédiments ne sont pas dangereux ».

La gestion à terre des sédiments passe donc par une qualification des matériaux à extraire au regard des seuils réglementant la gestion des déchets :

A18.6.1 - Seuils des Installations de Stockage de Déchets (ISD)

Les valeurs limites d'acceptabilité des déchets en **Installations de Stockage de Déchets** (Tableau 41) sont édictées à travers les textes réglementaires suivants :

- Arrêté du 28 octobre 2010 fixant la liste des types de déchets inertes admissibles dans les Installations de Stockage de Déchets Inertes (ISDI, anciennement dénommé CET de classe 3) et les conditions d'exploitation de ces sites ;
- Décision n° 2003/33/CE du 19/12/02 établissant des critères et des procédures d'admission des déchets dans les décharges, conformément à l'article 16 et à l'annexe II de la directive 1999/31/CE (ISDND, anciennement dénommé CET de classe 2) ;
- Arrêté du 30/12/02 relatif au stockage de déchets dangereux (ISDD, anciennement dénommé CET de classe 1).

<i>Paramètres</i>	<i>Unité</i>	<i>ISDD Arrêté du 30/12/2002</i>	<i>ISDND Décision conseil du 19/12/2002</i>	<i>ISDI Arrêté du 28/10/2010</i>
Arsenic (As)	mg/kg MS	25	2	0,5
Baryum (Ba)	mg/kg MS	300	100	20
Cadmium (Cd)	mg/kg MS	5	1	0,04
Chrome (Cr)	mg/kg MS	70	10	0,5
Cuivre (Cu)	mg/kg MS	100	50	2
Mercurure (Hg)	mg/kg MS	2	0,2	0,01
Molybdène (Mo)	mg/kg MS	30	10	0,5
Nickel (Ni)	mg/kg MS	40	10	0,4
Plomb (Pb)	mg/kg MS	50	10	0,5
Antimoine (Sb)	mg/kg MS	5	0,7	0,06
Sélénium (Se)	mg/kg MS	7	0,5	0,1
Zinc (Zn)	mg/kg MS	200	50	4
Chlorure (Cl ⁻)	mg/kg MS	25 000	15 000	800
Fluorure (F ⁻)	mg/kg MS	500	150	10
Sulfates (SO ₄ ²⁻)	mg/kg MS		20 000	
Indice phénol	mg/kg MS			1
COT	mg/kg MS	1 000	800	500
Fraction Soluble (FS)	mg/kg MS	100 000	60 000	4 000
HCT *	mg/kg MS		2 500	500
16 HAP *	mg/kg MS			50
7 PCB *	mg/kg MS			1
BTEX *	mg/kg MS			6
COT *	mg/kg MS			30 000

*Tableau 41 : Valeurs limites des concentrations sur éluats et sédiment brut**

Article L 541-4-1 et circulaire du 24 décembre 2010 relative aux modalités d'application des décrets n°2009-1341, 2010-369 et 2010-875 modifiant la nomenclature des installations classées.

4.1.1 Critère de dangerosité « H14 sédiment »

La caractérisation de la dangerosité des déchets se fait au regard des propriétés énumérées à l'Annexe I au R541-8 du C.E (décret n°2002-54).

Sur les 14 critères de dangerosité « H », le critère H14 d'écotoxicité semble aujourd'hui le plus pertinent pour définir la dangerosité d'un sédiment, eu égard à la note du MEDD du 18 septembre 2002. La mise en œuvre du test de dangerosité « H14 - sédiment » est préconisée dans **le cadre d'une gestion à terre des déchets issus des dragages**. Ce protocole encore à l'étude vise à définir l'écotoxicité des matériaux à travers une série de bio-essais aiguës ou chroniques sur l'éluat de lixiviation du matériau, l'eau interstitielle et enfin le matériau brut lui-même (*cf. Document Annexes Chap...*).

Remarque : A noter que le déclenchement ou non de la procédure du test H14 est prévu, en l'état, si au moins un dépassement d'un des seuils S1 de l'Arrêté du 9 Août 2006 est constaté. Le protocole tel qu'il a été testé, étudié et pour proposition au Ministère est disponible. rapport final d'étude sur ce protocole est prévu pour le printemps 2012.

A18.6.2 - Valorisation agronomique

A défaut de valeurs seuils réglementaires de gestion des sédiments à terre, les valeurs de l'**Arrêté du 8 janvier 1998** relatif à l'épandage des boues de station d'épuration ont souvent été prises en compte pour les sédiments extraits des opérations de dragage et en vue d'une valorisation à terre en épandage ou reconstitution de sol.

Il n'en demeure pas moins que des différences notables existent entre sédiment et boues de STEP en termes de composition et de volumes à gérer.

Les niveaux de référence relatifs à la législation sur l'épandage des boues de STEP sont rappelés dans le tableau suivant. Cette législation fixe deux seuils, les valeurs limites dans les boues et les valeurs limites dans les sols, autorisant ou non le dépôt à terre (cf. *Tableau 42*).

Arrêté du 8 janvier 1998		
<i>Valeur limite (en mg/kg MS) acceptée dans les boues pour :</i>		
<i>Utilisation possible</i>	<i>Epandre</i>	<i>Reconstituer un sol</i>
MÉTAUX TRACES		
<i>Cadmium</i>	10	2
<i>Chrome</i>	1000	150
<i>Cuivre</i>	1000	100
<i>Mercure</i>	10	1
<i>Nickel</i>	200	50
<i>Plomb</i>	800	100
<i>Zinc</i>	3000	600
COMPOSÉS ORGANIQUES		
<i>PCB</i>	0,8	
<i>Fluoranthène</i>	5	
<i>Benzo(b)fluoranthène</i>	2,5	
<i>Benzo(a)pyrène</i>	2	

Tableau 42 : Seuils réglementaires propres à l'épandage et à la reconstitution des sols

A18.6.3 - Autres valeurs repère

FNADE

Guide SETRA

A18.6.4 - Autres programmes de collecte de données de qualité sédiment

A l'échelle nationale

Sédimentothèque (programme Sédimar) attention : marin

A l'échelle du Bassin Rhône-Alpes : OSR

A18.7 - SYNTHÈSE DES RÉFÉRENTIELS ET MISE EN APPLICATION

	Référentiels	Origine du référentiel	Contexte de mise en œuvre
RESTITUTION AU MILIEU AQUATIQUE	Seuils Loi sur l'Eau S1 (Arrêté 9/08/2006)	Valeurs écotoxicologiques pour certains paramètres	Critère de déclenchement de procédure administrative (Déclaration / Autorisation). Préambule à tout projet en lien avec le milieu aquatique impliquant une remobilisation de sédiment.
	Seuils « S1 / S2 » (PCB)	Valeurs écotoxicologiques proposées par l'IRSTEA, SNRS, DIREN de Bassin	Objectifs de non dégradation du milieu, lors des opérations de dragage
	PNEC_{sed}	Valeurs écotoxicologiques validées par organismes d'Etat (INERIS, IFREMER, US EPA..)	Protection des peuplements benthiques
	NQE	DCE, sur la base des PNEC	Objectifs de protection de la ressource en eau (bon état écologique et chimique)
GESTION A TERRE	Bruit de fond géochimique	Concentration en contaminant du sol et des sédiments pour une aire géographique donnée Source : INRA	Référentiel pouvant être utilisé pour la relativisation des impacts
	Seuils « épandage » et « sols » (Arrêté du 8/01/1998, boues de STEP)	Equivalent Seuil S1 + Arsenic	Valorisation agronomique en épandage, ou reconstitution de sol
	Valeurs guides SETRA (nov. 2010)	SETRA / MEDD Valeurs basées sur les seuils inertes de l'Arrêté du 28/10/2010	Valorisation des sédiments en sous-couche routière
	Seuils « Déchets » : Inerte / Non Dangereux / Dangereux Arrêté 28/10/2010	Valeurs seuils sur éluat et matériaux bruts	Stockage/Élimination : qualification du sédiment au regard de la nomenclature Déchets
	H14 (2012)	BRGM / MEDD	Critère de définition de la dangerosité d'un sédiment en vue d'une gestion à terre

Tableau 43 : Synthèse des référentiels disponibles pour les sédiments selon les contextes et mise en application

A19 - TECHNIQUES DE TRAVAUX, IMPACTS ET REDUCTION DES IMPACTS

Il existe un grand nombre de techniques d'intervention sur les sédiments allant du simple battage de palplanches aux systèmes automatisés de curage. Néanmoins, chaque opération doit avant tout être cohérente avec les aspects suivants :

- La nature et l'emprise des travaux projetés ;
- Les caractéristiques du gisement sédimentaire : volume, niveau de contamination
- Les impacts générés sur l'environnement et le contexte socio-économique ;
- La réglementation en vigueur.
- Les coûts de l'opération à court et long terme ;

Le choix d'utilisation d'une technique plutôt qu'une autre est donc conditionné par de nombreux critères d'ordre économique, environnemental mais surtout technique. Les descriptifs techniques des moyens d'intervention sont synthétisés ci-après.

Globalement, il existe deux grands moyens d'extraction de sédiments aquatiques, qu'il y ait remise à l'eau ou dépôt à terre : le **curage mécanique** et le **curage hydraulique**.

S'ajoute le **curage par agitation**, qui lui n'est utilisé que pour une remise à l'eau.

Ils présentent la caractéristique de générer un taux de matière en suspension, la forme extrême étant la méthode par agitation.

A19.1 - CURAGE MÉCANIQUE

Le principe de fonctionnement est basé sur l'extraction des sédiments à l'aide d'un outil de préhension qui ne déstructure que faiblement les matériaux et minimise les prélèvements d'eau. Les volumes retirés et transportés sont donc, aux foisonnements près, sensiblement voisins de ceux en place.

Impact MES : La dispersion des sédiments et matières en suspension, sans être nulle, peut être minimisée par le choix du matériel (voir ci-dessous) et les précautions de l'opérateur.

La benne preneuse a un impact MES supérieur à la pelle mécanique, notamment du fait qu'elle est utilisée pour des profondeurs supérieures et donc le trajet de remontée est plus important ; de plus l'égouttement est important lors de la sortie de l'eau.

Le curage mécanique peut être mis en œuvre avec des moyens de décaissement variables (godet, benne preneuse,...). Les machines interviennent généralement sur l'eau à partir de pontons flottants ou d'engins amphibies. La faisabilité de l'intervention dépend alors des hauteurs d'eau disponibles. Le curage mécanique est également envisageable à sec comme c'est le cas sur les canaux et plans d'eau artificiels où la maîtrise des niveaux d'eau est permise.



Figure 104 : Pelle mécanique bras long et pelle mécanique sur ponton



Figure 105 : Pelle amphibie en action [IDRA]



Figure 106 : Curage à l'aide d'une benne preneuse

A19.2 - CURAGE HYDRAULIQUE

Le principe d'extraction des engins hydrauliques est basé sur une dilution des sédiments avec l'eau, le mélange créé est aspiré et refoulé via des canalisations. Les volumes refoulés sont donc plus importants que ceux en place (1 volume de sédiment en moyenne pour 10 volumes d'eau).

Impact MES : Dans le cas de remise en eau, la dispersion de matières en suspension est très importante, elle est très faible dans le cas d'exportation directe à terre (à condition de ne pas avoir de retour de ruissellements en berge).

Les sédiments peuvent être préalablement désagrégés à l'aide d'un cutter. Par définition, cette technique n'est utilisable que sur un milieu en eau à l'aide de dragues aspiratrices.



Figure 107 : Dragage aspiratrice (le cutter est visible en tête du bas aspirant)

Pour une gestion à terre des sédiments, cette technique nécessite une certaine disponibilité foncière. En effet, le mélange refoulé doit être renvoyé vers un site de prétraitement à terre pour « concentrer » les sédiments et gérer les eaux de rejets.



Figure 108 : Exemple de prétraitement en bassin de décantation ou géotextile filtrant [IDRA, Tencate]

Dans le cas d'une gestion à terre, la remise en suspension est minimisée, puisque le mélange aspiré est directement envoyé à terre dans des systèmes de rétention.

A19.3 - CURAGE PAR AGITATION

Cette technique consiste à remettre en suspension les sédiments dans la colonne d'eau tout en profitant des processus de dilution et de courant. Il existe de nombreux dispositifs créés à cet effet, on citera entre autres :

- *Le rotodévaseur* : Embarcation munie d'une fraise horizontale qui déstructure le matériau et le remet en suspension dans l'eau ;
- *Les agitateurs* : Dispositifs mécaniques à hélices ou hydrauliques injectant de l'eau qui chassent le sédiment et le remettent en suspension dans l'eau.

Impact MES : L'impact est maximum, puisque la remise en suspension dans le courant est la base de la méthode de dragage.



Figure 109 : Rotodévaseur



Figure 110 : Système d'agitateur à hélices

A19.4 - IMPACTS DE L'EXTRACTION DES SÉDIMENTS

Les travaux sur sédiments immergés conduisent à des remises en suspension plus ou moins importantes selon les techniques (confer ci-dessus).

Le clapage, par exemple, s'accompagne de divers phénomènes de dispersion, en fonction de la granulométrie et des courants. En l'absence de courant au sein de la masse d'eau, un étalement de fond se produit du fait de courants de densité.

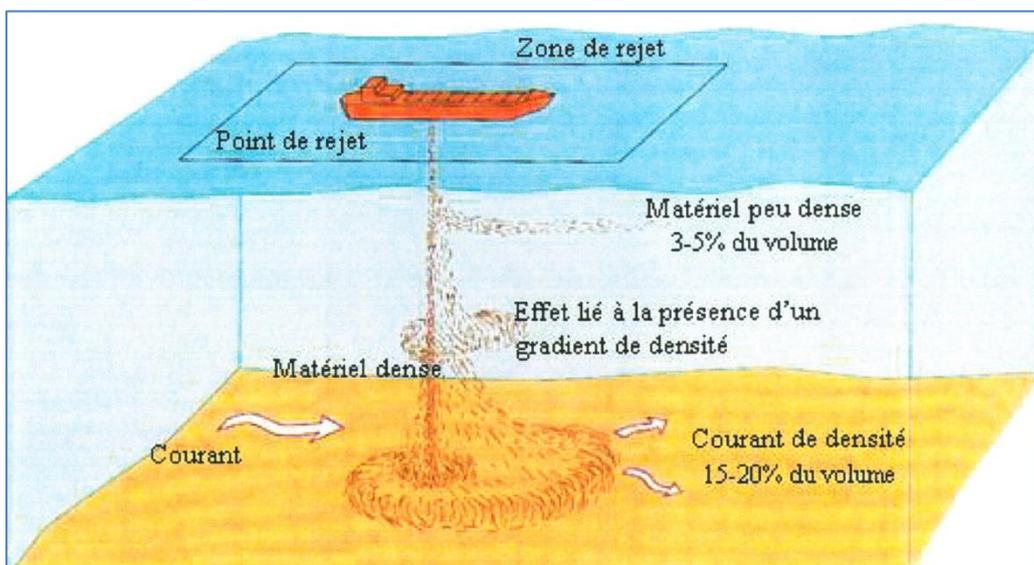


Figure 111 : Dispersion des sédiments au cours d'un clapage (Alzieu, 1988).

En se limitant aux opérations de curage, les différents impacts résultant du fonctionnement des engins de curage sont listés ci-dessous :

A19.4.1 - Pollutions accidentelles du milieu aquatique

Les pollutions accidentelles susceptibles de survenir concernent les fuites d'hydrocarbures (huiles, carburant) par l'engin de curage ou les pertes de sédiment dans le cas d'un objectif de non remise à l'eau (mauvaise étanchéité des barges, erreurs de manipulation). Il en résultera une dégradation plus ou moins conséquente du milieu aquatique.

Par précaution, les engins de curage devraient utiliser des huiles de type végétal et biodégradable. L'étanchéité des barges doit être systématiquement contrôlée avant mise en service.

Les autres pollutions accidentelles revêtent un caractère exceptionnel qui ne présente pas un véritable danger si une réaction immédiate d'arrêt du chantier et de nettoyage est menée. Les volumes de carburant seront minimes et stockés à l'écart du milieu aquatique (bac de rétention). Les moyens de lutte contre ces pollutions (absorbant d'hydrocarbures, barrages flottants) seront disponibles à proximité des ateliers de curage et de reprise à terre des sédiments. Des exigences sur ces points seront formulées dans le cadre des consultations d'entreprises.

A19.4.2 - Augmentation de la turbidité de l'eau

Concrètement, les impacts liés à une augmentation des Matières En Suspension (MES) se traduisent de différentes façons dans le milieu aquatique.

a. Impacts sur le milieu pélagique (phytoplancton, poissons)

L'augmentation des concentrations en MES peut se traduire à court terme par une chute de l'oxygène dissous et une augmentation des teneurs en ammoniac¹⁰ dans la colonne d'eau. A plus long terme, le changement des conditions physico-chimiques (réoxydation des sédiments anoxiques) peut entraîner un relargage des contaminants adsorbés sur les MES comme les métaux. Le phytoplancton et les poissons sont les principaux organismes aquatiques concernés par le panache de MES.

Concernant les risques de relargage de contaminants contenus par les sédiments, il a été montré que la désorption des contaminants n'intervenait qu'à des échelles de temps incompatibles avec la durée de vie du panache turbide. Les contaminants restent alors sous forme particulaire et sédimentent avec le panache. En milieu lacustre, un calcul théorique montre que les MES décanteront en 5 heures maximum¹¹. L'ammoniac est le principal facteur de toxicité au moment de l'opération de curage.

b. Impacts sur le milieu benthique (macrofaune, frayère)

En se déposant sur les fonds, les MES forment une couche superficielle faiblement cohésive, dite couche néphéloïde. A long terme, les invertébrés benthiques sont directement affectés par les contaminants adsorbés sur ces MES (processus de bioaccumulation et bioamplification le long de la chaîne trophique). Dans des cas extrêmes, lorsque les sédiments sont restitués au milieu aquatique, les MES forment des dépôts et recouvrent les fonds (destruction de la macrofaune et des frayères).

c. Impacts sur la végétation aquatique

L'incidence des curages concerne les systèmes végétaux des berges, herbiers aquatiques et zones de roselières qui constituent à la fois un habitat, une source de nourriture et une zone de reproduction pour de nombreuses espèces aquatiques.

L'augmentation des teneurs en MES peut affecter temporairement la transparence de l'eau et indirectement l'activité photosynthétique des végétaux. De plus, la croissance des végétaux peut être ralentie voir stoppée à cause de dépôts massifs et répétés par l'envasement des fonds.

A19.5 - RÉDUCTIONS DES IMPACTS DES TRAVAUX

Certaines mesures permettent de réduire, dans certains cas, l'impact et la propagation des sédiments mis en suspension à l'occasion de travaux de dragage. Elles sont fonctions des techniques et des milieux.

A19.5.1 - Cours d'eau / Plan d'eau

En cours d'eau, le courant est un facteur de dispersion inévitable et seuls :

- le choix de l'outil ;
- des précautions dans les manœuvres ;
- le choix de périodes avec des régimes hydrologique faibles ;

peuvent réduire les impacts.

Confer *Figure 81 –Chute des matériaux clapés à partir d'une barge., page 115.*

En plan d'eau, l'absence de courant (en général), permet d'utiliser avec plus d'efficacité des méthode des de réduction de la dispersion des fines. Il s'agit essentiellement de barrages flottants ou de tubes ou « chaussettes » de clapage.

A19.5.2 - Protection de la zone de dragage - Barrages flottant, godet à clapet

Des barrages anti-MES peuvent être disposés autour des engins de curage et de la zone de chargement en barge pour limiter les risques dispersion des sédiments. Ces barrages flottants sont déplacés au gré de l'avancement du chantier.



Le barrage flottant est équipé d'une jupe en géomembrane (200gr/m²) immergée et stabilisée par un lest bas périphérique.

Figure 112 : Barrage flottant.



Figure 113 : Godet à clapet pour éviter la dispersion des sédiments à la remontée.

A19.5.3 - Protection de la zone de clapage - Tube plongeur

Un tube plongeur télescopique peut être utilisé pour l'immersion des matériaux dragues en profondeur. Il est constitué d'éléments mobiles assemblés en acier ou en polyéthylène.

En milieu lacustre, il peut permettre une immersion en deçà, de la thermocline et une meilleure maîtrise du panache dans le milieu.

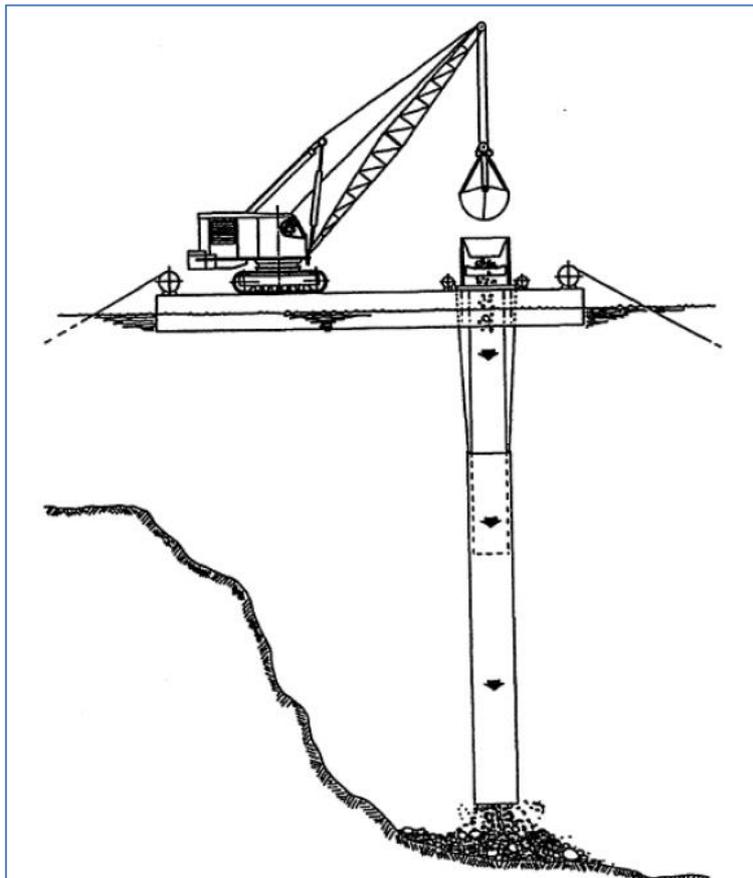


Figure 114 : Tube plongeur pour réduire les panaches de clapage (source OFEFP).

A20 - BIBLIOGRAPHIE

ALZIEU C., 1999 – *Dragage et environnement marin – Etat des connaissances – IFREMER – 210p ;*

AQUAREF, 2011. – *Guide des prescriptions techniques pour la surveillance physico-chimique des milieux aquatiques, échantillonnage et analyse des eaux et des sédiments en milieu continental.* Rapport avec la participation de l'INERIS, BRGM, CEMAGREF, LNE. – 96p.

Aquaref, 2011. – *Guide d'échantillonnage et de pré-traitement des sédiments en milieu continental pour les analyses physico-chimiques de la DCE – ONEMA, MEDDTL –24p.*

BABUT M. & MEIGE, 2008. – Proposition de seuils décisionnels temporaires pour la gestion des sédiments à draguer dans le Rhône. CEMAGREF – 7 p.

Babut M., Perrodin Y, et al., 2004 – *Méthodologie d'évaluation écotoxicologique de matériaux de dragage : tests de la démarche & essais d'optimisation. Rapport final CEMAGREF, ENTPE, VNF, METL. 100 p.*

Bonnet C., 2000 – *Développement de bio-essais sur sédiments et applications à l'étude, en laboratoire, de la toxicité de sédiment dulçaquicoles contaminés. Thèse de Doctorat. Univ. de Metz, Laboratoire d'écotoxicologie CEMAGREF.*

CHARRIAU A., 2010. – *Etude de la contamination organique et métallique associée aux sédiments du District Hydrographique International de l'Escaut.* Agence de l'Eau Artois Picardie, Région Nord Pas de Calais, CNRS, Géosystème, Université de Lille 1. 33p.

CETMEF, 2011. – *Dragage d'entretien des voies navigables, aide à l'élaboration et au suivi d'un plan de gestion pluriannuel.* 185 p.

CETMEF, 2009 – *Dragage hydrodynamique – Etat des lieux des pratiques françaises et recommandations générales – CETMEF, MEDDTL – 80p ;*

Communauté d'Agglomération du lac du Bourget, IDRA Environnement SA, 2009 - SCHEMA DIRECTEUR DU CURAGE DES PORTS DU LAC DU BOURGET

ENV. CANADA, 1994. – *Document d'orientation sur le prélèvement et la préparation de sédiments en vue de leur caractérisation physico-chimique et d'essais biologiques – Rapport SPE 1/RM/29 – Série de la protection et de l'environnement – 178p ;*

GEFFARD, 2001. – *Toxicité potentielle des sédiments marins et estuariens contaminés : évaluation chimique et biologique, biodisponibilité des contaminants sédimentaires.* Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux I – 376p ;

GHESTEM JP., avec la participation de LACGENAL J. (LNE), 2008. – *L'assurance qualité pour les prélèvements dans les milieux aquatiques en vue d'analyses physico-chimiques : état des lieux 2008.* BRGM/RP-56859-FR, 63p, 2 illustrations, 2 annexes.

JEANNOT R., LEMIERE B., CHIRON S., 2000 – *Guide méthodologique pour l'analyse des sols pollués. Rapport BRGM R 50128, 110 p, 44 fig., 3 annexes*

JORF, 1998. – Arrêté du 08/01/98 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles pris en application du décret n°97-1133 du 08/12/97 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées.

JORF, 2006. – Arrêté du 9 août 2006 relatif aux niveaux à prendre en compte lors d'une analyse de rejets dans les eaux de surface ou de sédiments marins, estuariens ou extraits de cours d'eau ou canaux relevant respectivement des rubriques 2.2.3.0, 4.1.3.0 et 3.2.1.0 de la nomenclature annexée au décret no 93-743 du 29 mars 1993.

JORF n°147, 2008. – Arrêté du 30/05/08 fixant les prescriptions générales applicables aux opérations d'entretien de cours d'eau ou canaux soumis à autorisation ou à déclaration en application des articles L.

214-1 à L. 214-6 du code de l'environnement et relevant de la rubrique 3.2.1.0 de la nomenclature annexée au tableau de l'article R. 214-1 du code de l'environnement.

JORF, 2010. – Arrêté du 28 octobre 2010 relatif aux installations de stockage de déchets inertes. NOR: DEVP1022585A.

LACHAMBRE & FISSON, 2007. – *Contamination chimique en estuaire de Seine - Fiches substances d'origines naturelles et anthropiques* – Groupement d'intérêt public Seine-Aval ;

METL, 2000. – *Circulaire n°2000-62 du 14 juin 2000 relative aux conditions d'utilisation du référentiel de qualité des sédiments marins ou estuariens présents en milieu naturel ou portuaire défini par arrêté interministériel. Instructions techniques portant sur le prélèvement et l'analyse des déblais de dragage – volet échantillonnage.* pp 7-9.

Mouvet C., Vaillant P., Babut M., Pandard P., 2009 – *Test H14 pour les sédiments : présentation du protocole proposé pour validation par le groupe de travail « dangerosité des sédiments » du MEEDDM et argumentaire succinct de choix effectués.* 6 p.

MURDOCH & MACKNIGHT, 1991. – *Handbook of Techniques for Aquatic Sediments Sampling* – CRC Press, Inc., Boca Raton, FL – 210p ;

UNEP, 2007. – *Manuel d'échantillonnage et d'analyse des sédiments.* Programme des Nations Unies pour l'Environnement - Plan d'action pour la méditerranée. UNEP(DEPI)/MED WG.321/Inf.4 – 29p.

Santiago S., et al., 2002 – *Guide pour l'utilisation des tests écotoxicologiques avec Daphnies, bactérie luminescentes, algues vertes, appliquées aux échantillons de l'environnement.* Groupe de travail « Tests écotoxicologiques » de la Commission internationale pour la protection des eaux du Léman. 49 p.+ annexes ;

VNF, 2011. – *Circulaire technique – Opération de dragage – VNF/SME/C-TEC/DRAG/e* – 26 p ;

Sites internet

Législation/Réglementation : <http://www.legifrance.gouv.fr/>

Protocole H14 : <http://www.brgm.fr/publication/pubDetailRapportSP.jsp?id=RSP-BRGM/RP-60835-FR>

